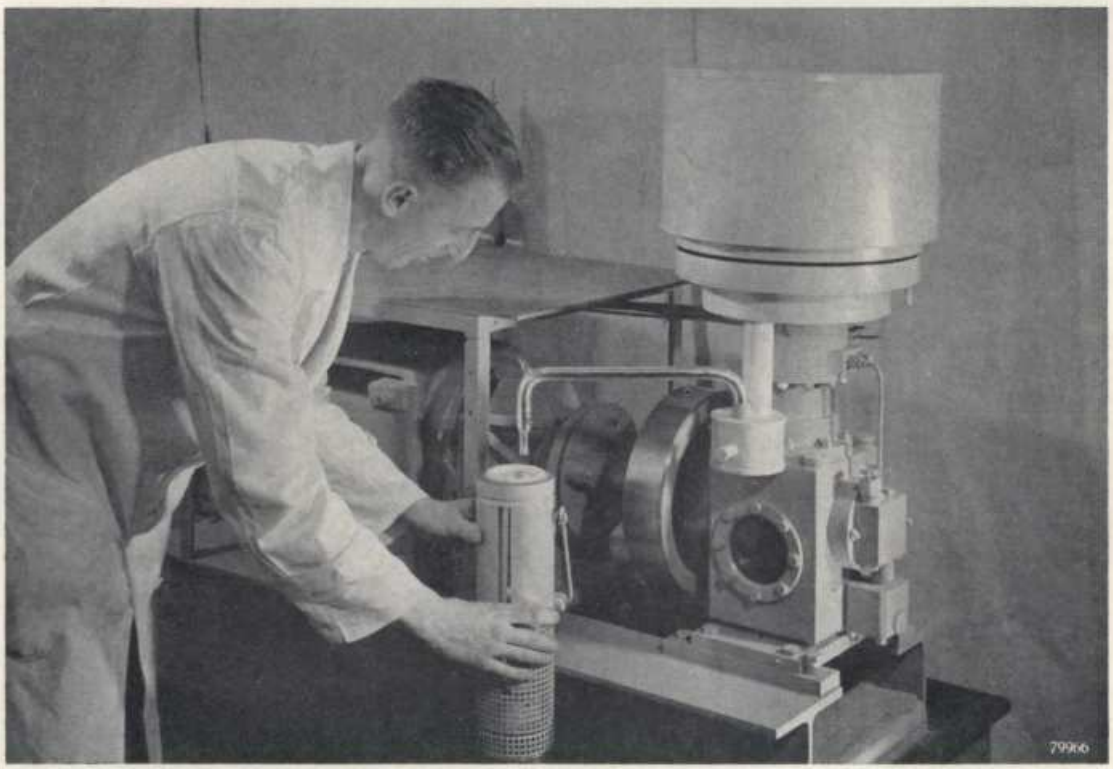
www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

16e JAARGANG No. 3, blz. 61-96 MAART 1954

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: NATUURKUNDIG LABORATORIUM DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN



CONSTRUCTIE VAN EEN KOUDGASKOELMACHINE

door J. W. L. KÖHLER en C. O. JONKERS.

621.573

Aan het koudgaskoelproces, dat parallel met het heetgasproces in het Philipslaboratorium te Eindhoven onderzocht is, zijn onlangs enkele theoretische beschouwingen gewijd. In het hier volgende artikel wordt op de uitvoering van het proces ingegaan en een machine beschreven waarin het gerealiseerd is. De met deze machine bereikte resultaten worden besproken; aan de hand hiervan wordt nagegaan waar dit nieuwe koelproces kan worden toegepast.

Indien men het koudgaskoelproces, waarvan de grondslagen in de vorige aflevering van dit tijdschrift [1]) beschreven zijn, in de practijk wil toepassen, stuit men op een aantal problemen die opgelost moeten worden alvorens men tot de constructie van een machine kan overgaan. Wij laten aan de bespreking hiervan een korte herhaling van het principe van het koudgaskoelproces voorafgaan.

Een hoeveelheid gas wordt bij kamertemperatuur gecomprimeerd. Het gas wordt vervolgens tot de gewenste lage temperatuur afgekoeld, bij welke temperatuur men het laat expanderen; de hierbij geproduceerde koude wordt nuttig gebruikt. Na de

[1]) J. W. L. Köhler en C. O. Jonkers, Grondslagen van de koudgaskoelmachine, Philips techn. T. **16**, 33-42, 1954 (No. 2); verder aangehaald als I.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

expansie wordt het gas weer tot kamertemperatuur verwarmd, waarmee de kringloop gesloten is. Het afkoelen en weer verwarmen van het gas geschiedt door warmteuitwisseling in een regenerator. Het werkende medium bevindt zich steeds in de gasphase en wordt als een ideaal gas beschouwd.

Wij hebben reeds meegedeeld, dat tijdens het onderzoek gebleken is dat de op dit principe gebaseerde machines gunstige eigenschappen hebben indien zij gebruikt worden om koude te leveren tussen —80 °C en —200 °C. Deze beperking volgt echter geenszins uit de bespreking van het ideale proces volgens I. Het rendement van dit proces is bij alle vriestemperaturen gelijk aan dat van het Carnot-proces; *het ideale proces kan dus bij geen enkele temperatuur uit het oogpunt van rendement overtroffen worden*. De voorwaarde dat het medium zich met voldoende benadering als een ideaal gas gedraagt, vormt bij —200 °C nog geen beperking, daar hieraan, bij gebruik van waterstof of helium, zelfs bij veel lagere temperaturen voldaan is.

Begrenzing van het proces

Het blijkt nu dat de begrenzing van het proces tot het genoemde temperatuurgebied veroorzaakt wordt door afwijkingen van het ideale proces, die bij de realisatie optreden. Hierdoor wordt het asvermogen vergroot en het koelvermogen verkleind; waar deze grootheden het kleinst zijn, wegen veranderingen erin het zwaarst. *Fig. 1* toont dat men dus kan verwachten *dat afwijkingen in het asvermogen het proces bij hoge temperatuur begrenzen en afwijkingen in het koelvermogen bij lage temperatuur*. Zo ontstaat het genoemde gunstigste werkgebied, waarin het werkelijke rendement het minst van het ideale afwijkt; dit is geïllustreerd in *fig. 2*. De juiste grenzen van dit gebied kunnen wij niet afleiden, daar deze sterk afhangen van de huidige en toekomstige technische mogelijkheden. Wij zullen nu de afwijkingen, die de begrenzing veroorzaken, meer in detail onderzoeken.

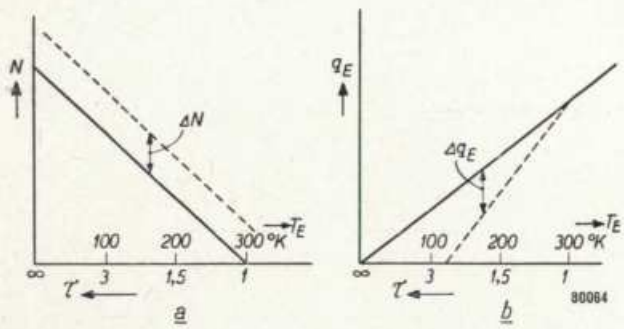


Fig. 1. Geschematiseerd beeld van het asvermogen N en het koelvermogen q_E van de koudgaskoelmachine als functie van de temperatuurverhouding $\tau = T_C/T_E$ (T_C = temperatuur van de koeler ≈ 300 °K, T_E = de vriestemperatuur, d.i. de gewenste lage temperatuur). De getrokken lijnen slaan op de ideale machine (zie fig. 10 in I), de gestippelde op een machine waarbij de diverse oorzaken van verliezen werkzaam zijn.

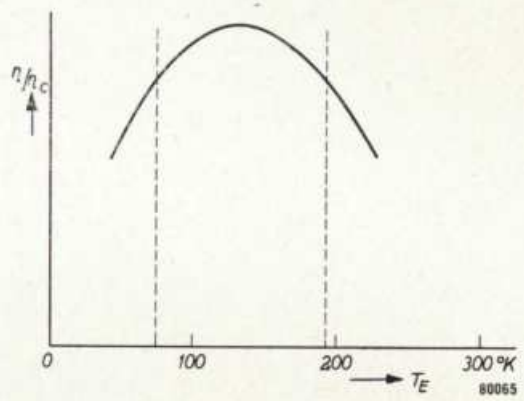


Fig. 2. De „kwaliteitsfactor" η/η_c van de koudgaskoelmachine als functie van de vriestemperatuur T_E (η = rendement van de werkelijke machine, η_c = Carnot-rendement, zie I). Men ziet hoe door de invloed der verliezen het temperatuurgebied waarin de machine goed bruikbaar is wordt beperkt.

Afwijkingen die het asvermogen vergroten

In het drijfwerk van elke machine treden wrijvingsverliezen op, zodat een zeker extra vermogen moet worden toegevoerd om de machine te doen draaien. De absolute waarde van dit „mechanische verlies" is bij de koudgaskoelmachine weinig afhankelijk van de vriestemperatuur, zoals de gestippelde kromme in fig. 1*a* aangeeft[2]); de relatieve invloed van het verlies is dus bij hoge temperatuur het grootst.

Een andere afwijking, die hetzelfde karakter heeft als het mechanische verlies, is het zg. „adiabatische verlies". Wij hebben in I aangenomen dat in de cylinders het warmtecontact tussen het gas en de omringende wanden zo goed is dat de compressiewarmte en de expansiekoude ter plaatse afgevoerd kunnen worden. Dit kan echter moeilijk verwezenlijkt worden en daarom plaatst men tussen de cylinders en de regenerator warmteuitwisselaars (een „koeler" aan de compressiezijde en een „vriezer" aan de expansiezijde), die het contact van het inwendige van de machine met de buitenwereld bewerkstelligen. Het medium stroomt in deze

[2]) De drukverhouding, die de in het drijfwerk optredende krachten en verliezen bepaalt, hangt nl. weinig van de vriestemperatuur af. Terloops zij opgemerkt dat de situatie bij de compressiekoelmachine anders is; daar kan het mechanische verlies bij stijgende verdampertemperatuur dalen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

warmteuitwisselaars door nauwe kanalen, waarin het een zeer goed warmtecontact met de wand heeft.

Nemen wij aan dat het warmtecontact in deze warmteuitwisselaars ideaal is, dan krijgen wij de situatie als is getekend in *fig. 3*, waar de temperaturen van de verschillende delen van het circuit schematisch aangegeven zijn. De temperatuur van de koeler wordt bepaald door de temperatuur van het koelwater, en de vriezertemperatuur door de temperatuur waarbij men de koude wenst te gebruiken, bijv. het condensatiepunt van lucht. Het gas stroomt de cylinders binnen met de temperatuur van

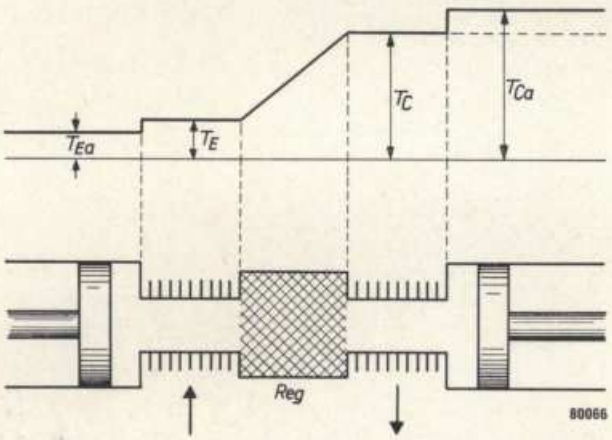


Fig. 3. Temperatuurverdeling in de koudgaskoelmachine. De machine is uitgerust met twee warmteuitwisselaars, die het warmtecontact van het werkmedium met de buitenwereld bewerkstelligen. De eerste (de „vriezer") bevindt zich op de lage temperatuur T_E, de tweede (de „koeler") op de kamertemperatuur T_C. Daartussenin, nl. in de regenerator (*Reg*), gaat de temperatuur geleidelijk van de ene naar de andere waarde over. De twee pijlen geven de richting van de warmtestroom aan. Door het adiabatische gedrag van het medium in de expansie- en de compressiecylinder is in de eerste de gemiddelde temperatuur T_{Ea} iets lager dan T_E, in de laatste de gemiddelde tempeartuur T_{Ca} iets hoger dan T_C. Dit is de oorzaak van het „adiabatische verlies".

de warmteuitwisselaars, waarna de gastemperatuur verder adiabatisch varieert volgens de drukvariatie in de machine. Dit betekent dat de gemiddelde temperatuur T_{Ca} in de compressieruimte hoger is dan de temperatuur T_C van de koeler (omdat het gas gecomprimeerd wordt), en de gemiddelde temperatuur T_{Ea} in de expansieruimte lager dan T_E. Men ziet dat $T_{Ca}/T_{Ea} = \tau_a > \tau$, dwz. de machine werkt inwendig bij een grotere temperatuurverhouding dan uitwendig. Uit fig. 1*a* volgt dat dan het asvermogen groter is dan in het isotherme geval. Men kan op eenvoudige wijze aannemelijk maken dat de waarde van het extra asvermogen zeer weinig van de vriestemperatuur afhangt, zodat de relatieve invloed, evenals bij de verliezen in het drijfwerk, bij hoge temperatuur het grootst is.

Voor het adiabatische proces kunnen wij, analoog aan de in I (verg. 14) voor het isotherme proces afgeleide uitdrukking $N_{is} = q_E(\tau - 1)$, schrijven:

$$N_a \approx q_E(\tau_a - 1);$$

de waarde van het koelvermogen q_E blijkt nl. voor beide processen ongeveer gelijk te zijn, doordat de daling die men wegens de grotere temperatuurverhouding volgens fig. 1*b* zou verwachten, gecompenseerd wordt door de stijging wegens de met het adiabatische proces gepaard gaande grotere drukverhouding. Het extra asvermogen bedraagt dus:

$$\Delta N_a = N_a - N_{is} \approx q_E(\tau_a - \tau) = q_E\,\tau\,(\frac{\tau_a}{\tau} - 1).$$

De verhouding τ_a/τ hangt zeer weinig van de vriestemperatuur T_E af, daar de drukverhouding weinig met de temperatuur verandert; wij schrijven:

$$\frac{\tau_a}{\tau} \approx 1 + \beta,$$

waarbij β niet van T_E afhangt. Hierdoor is

$$\frac{\Delta N_a}{N_{is}} \approx \frac{q_E\tau\beta}{q_E(\tau - 1)} = \frac{\beta T_C}{T_C - T_E},$$

waaruit men ziet dat de relatieve invloed van het adiabatische verlies het grootst is als T_E weinig van T_C verschilt.

Het adiabatische verlies is ongeveer evenredig met de drukverhouding. Men kan het verlies dus beperken door de drukverhouding te verkleinen; daarbij verkleint men echter ook het koelvermogen zodat men hiermee niet al te ver mag gaan.

Afwijkingen die het koelvermogen verkleinen

De koude delen van de machine kan men niet volledig tegen koudeverlies (of warmtetoevoer) door geleiding beschermen. Naarmate de vriestemperatuur lager wordt, neemt de invloed van dit „isolatieverlies" toe. Indien wij het warmtegeleidingsvermogen van het onderdeel, dat verlies veroorzaakt, G noemen, bedraagt het koudeverlies per tijdseenheid:

$$\Delta q_G = G(T_C - T_E) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Dit verlies moet men vergelijken met het koelvermogen q_E, dat ongeveer evenredig is met T_E: $q_E \approx CT_E$. Dus:

$$\frac{\Delta q_G}{q_E} \approx \frac{G}{C}\,\frac{T_C - T_E}{T_E} = \frac{G}{C}\,(\tau - 1). \quad . \quad . \quad (2)$$

De relatieve invloed van het geleidingsverlies is dus bij zeer lage temperaturen vrijwel omgekeerd evenredig met de vriestemperatuur T_E (zie de gestippelde lijn in fig. 1*b*); de hoofdoorzaak hiervan is het dalen van het koelvermogen met T_E.

Het isolatieverlies door geleiding speelt bij koudgaskoelmachines slechts een kleine rol, daar de koude delen een zeer compacte bouw kunnen hebben.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het verlies dat door een niet-ideale regenerator veroorzaakt wordt draagt echter ook het karakter van een isolatieverlies, en dit kan veel moeilijker beperkt worden. *Dit „regeneratieverlies" vormt de hoofdbegrenzing voor het koelvermogen bij zeer lage temperaturen.* Wij zullen hiervan een globale schatting maken.

De hoeveelheid warmte Q_r die het gas op zijn weg van de compressieruimte naar de expansieruimte moet afstaan wordt opgeslagen in de „regeneratormassa". Hiervoor gebruiken wij een luchtige massa van dun draad; in deze draadprop stelt zich in de stroomrichting van het gas de temperatuurverdeling in die in fig. 3 schematisch is aangeduid.

Q_r bedraagt:

$$Q_r = W_g(T_C - T_E), \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

waarin W_g de warmtecapaciteit van het per halve periode door de regenerator stromende gas betekent. In de practijk wordt echter niet de gehele hoeveelheid warmte Q_r aan de regeneratormassa overgedragen, doch iets minder, nl. $\eta_r Q_r$, waarin η_r het rendement van de regenerator voorstelt ($\eta_r = 1$ bij ideale regeneratie). Het verschil tussen Q_r en $\eta_r Q_r$, dat wij ΔQ_r noemen, is het regeneratieverlies:

$$\Delta Q_r = Q_r - \eta_r Q_r = (1-\eta_r)\, W_g\, (T_C - T_E), \quad (4)$$

of per seconde:

$$\Delta q_r = w_g\, (1-\eta_r)\, (T_C - T_E), \quad . \quad . \quad . \quad (4a)$$

waarin $w_g = nW_g/60$ en n het aantal omwentelingen per minuut voorstelt.

Dit regeneratieverlies vernietigt een deel van de geproduceerde koude en vermindert dus het koelvermogen. Vergelijken wij (4a) met (1), dan zien wij dat het regeneratieverlies formeel het karakter van een isolatieverlies heeft, als wij $w_g(1-\eta_r)$ opvatten als het geleidingsvermogen van de regenerator.

Het relatieve regeneratieverlies is nu:

$$\frac{\Delta q_r}{q_E} \approx \frac{w_g}{C}\,(1-\eta_r)\,\frac{T_C - T_E}{T_E} = \frac{w_g}{C}\,(1-\eta_r)\,(\tau - 1). \quad (5)$$

w_g/C hangt weinig van T_E af; de waarde ervan bedraagt ongeveer 7. De volgende *tabel*, die berekend is voor $\eta_r = 0{,}99$ (een waarde die in de practijk bereikt kan worden), laat zien welke invloed het regeneratieverlies in verschillende gevallen heeft. Bij het kookpunt van lucht treedt dus het alleszins acceptabele verlies van 21 % op. Bij 20 °K is het echter gestegen tot 98 %, zodat het koelvermogen volledig door het regeneratieverlies vernietigd wordt. Ter vergelijking is de waarde voor de heetgasmotor opgenomen; men ziet dat daar het regeneratieprobleem van minder fundamenteel belang is dan bij de koelmachine.

	T_E in °K	$\frac{\Delta q_r}{q_E}$ in %
vloeibare lucht	75	21
vloeibare waterstof	20	98
heetgasmotor	900	4,7

Er zijn twee hoofdoorzaken die maken dat het rendement van regeneratoren van 1 afwijkt, nl. de niet-ideale warmteoverdracht tussen het gas en de regeneratormassa, en de eindige warmtecapaciteit van deze massa. Door de niet-ideale warmteoverdracht zal het gas niet precies de temperatuur van de regeneratormassa volgen, waardoor het niet tot de juiste temperatuur afgekoeld of verwarmd wordt; wegens de eindige warmtecapaciteit van de massa verandert hiervan de temperatuur tijdens het doorstromen van het gas, hetgeen hetzelfde gevolg heeft. Het verband tussen warmteoverdracht, warmtecapaciteit en rendement van regeneratoren is o.a. door Hausen behandeld [3]; de belangstellende lezer verwijzen wij naar diens publicatie.

Overige afwijkingen; dimensionnering van de machine

Behalve de reeds besproken afwijkingen, die het toepassingsgebied van het koudgaskoelproces beperken, zijn nog enkele oorzaken aanwezig die bij de realisatie het rendement verkleinen; wij willen deze hier kort bespreken.

Bij fig. 3 is uitdrukkelijk ondersteld dat de koeler en de vriezer ideaal zijn. Is dit niet het geval, dan treden temperatuurverschillen op, zowel aan de binnenzijde als aan de buitenzijde van de warmteuitwisselaars; bovendien ontstaat een temperatuurverschil tussen de binnenkant en de buitenkant ten gevolge van de warmteweerstand van het materiaal van de warmteuitwisselaar. Zo wordt de gastemperatuur in de koeler hoger en in de vriezer lager dan gewenst, waardoor de machine inwendig met een te grote temperatuurverhouding moet werken. Deze afwijking vertoont overeenkomst met het adiabatische verlies, maar is minder belangrijk [4].

Bij het ontwerpen van een koudgaskoelmachine tracht men dus de warmteoverdracht in de koeler, de regenerator en de vriezer zo groot mogelijk te maken. Deze vergroting van het warmteoverdragend vermogen heeft echter ook nadelige gevolgen. De genoemde onderdelen vormen nl. weerstanden voor het gas, dat tussen de compressieruimte en de

[3]) H. Hausen, Z. angew. Math. Mech. **9**, 173-200, 1929.
[4]) In tegenstelling met het adiabatische verlies wordt door deze afwijking het koelvermogen wel verkleind.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

expansieruimte heen en weer stroomt. Om deze stroming te doen plaats vinden, is een zeker drukverschil tussen deze ruimten nodig. Het gevolg hiervan is dat extra asvermogen toegevoerd moet worden en dat het koelvermogen daalt. Dit „stromingsverlies" is ten nauwste gekoppeld met de grootte van de warmteoverdracht en met de doortocht (totale doorsnede) van de kanalen. Het is duidelijk dat in de practijk met een compromis genoegen genomen moet worden, waarbij men zal streven naar een redelijke warmteoverdracht bij acceptabele waarden van het stromingsverlies en de schadelijke ruimte.

Het is niet eenvoudig een handleiding te geven voor het bepalen van de waarden der parameters die het ontwerp van de machine beheersen; de keuze wordt bovendien, zoals op elk gebied, beïnvloed door de persoonlijke voorkeur van de ontwerper. Hier volgen enkele algemene gezichtspunten.

In de practijk zal men een koelmachine moeten construeren die bij een voorgeschreven vriestemperatuur een bepaald koelvermogen heeft. Het koelvermogen is gegeven door formule (13) in I, die wij hier reproduceren:

$$q_E = 5{,}136\ \bar{p}\ V_0 \frac{\delta}{1+\sqrt{1-\delta^2}} \sin\Theta \frac{n}{1000}\ \text{watt}, \qquad (6)$$

met

$$\operatorname{tg}\Theta = \frac{w \sin\varphi}{\tau + w\cos\varphi}.$$

Voor een vrije keuze komen, van de variabelen in deze uitdrukking, slechts in aanmerking de gemiddelde druk $\bar{p}$, het volume van de expansieruimte V_0 en het toerental n; de waarde van τ is gefixeerd door de voorgeschreven vriestemperatuur, terwijl δ, φ, en w bij goed geconstrueerde machines tamelijk vast liggen ($0{,}3<\delta<0{,}4$, $60°<\varphi<120°$, w van de orde van 1). Daar men de machine voor het gegeven koelvermogen zo klein mogelijk wil maken (dus V_0 klein), moet men $\bar{p}$ en n zo groot mogelijk kiezen. Bij het vergroten van n wordt men beperkt door de verliezen (mechanisch verlies en stromingsverlies) en door eisen aangaande de levensduur. In feite kunnen wij dus slechts over de waarde van $\bar{p}$ vrij beschikken. *Maar in de verhoging van het drukniveau bezitten wij dan ook een uiterst effectief middel om de machine drastisch te verkleinen* — een mogelijkheid die bij de verdampingskoelmachine ontbreekt. Aan het verhogen van het drukniveau is een grens gesteld o.a. door de hiervoor nodige sterkte van de begrenzingswanden en de mechanische belasting van het drijfwerk.

Er is nog een reden die maakt dat men het drukniveau niet te hoog mag kiezen. Volgens formule (6) moet het koelvermogen bij toenemende druk lineair stijgen. In de practijk treden echter afwijkingen op waardoor het koelvermogen minder dan lineair met de druk toeneemt; de afwijkingen worden met stijgende druk relatief steeds groter, zodat ten slotte het koelvermogen zelfs gaat dalen (zie *fig. 4*). Dit verschijnsel heeft veroorzaakt dat met onze proefmachines in het begin geen lagere temperaturen dan ca. —160 °C konden

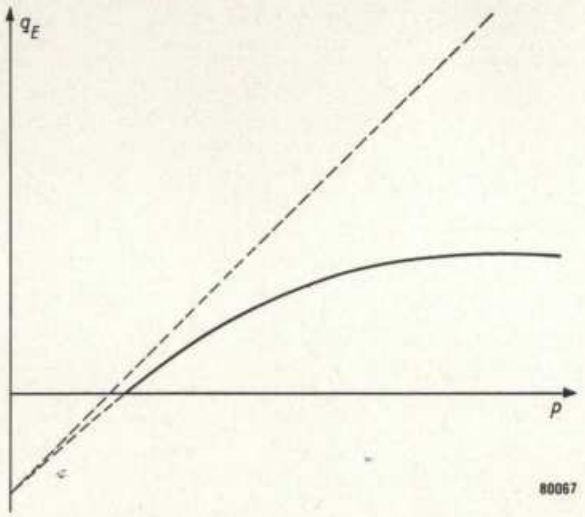


Fig. 4. Variatie van het koelvermogen q_E met de druk p in de machine. Theoretisch zou men (volgens verg. (13) in I) de gestippelde rechte lijn verwachten. Gemeten wordt een variatie volgens de getrokken kromme, waarbij dus in het gebied der hoge drukken het koelvermogen verrassenderwijze gaat dalen met toenemende druk.

worden bereikt (daar de afwijking bovendien toeneemt met dalende vriestemperatuur) en heeft ons lange tijd voor een raadsel geplaatst.

Voor dit gedrag blijkt een ingewikkelde koppeling tussen de regenerator en de rest van de machine verantwoordelijk te zijn. Zoals reeds werd vermeld, varieert de gemiddelde temperatuur van de regeneratormassa periodiek ten gevolge van het periodiek accumuleren en weer afstaan van warmte. Hierdoor wordt de normale drukvariatie in de machine gewijzigd, hetgeen leidt tot een kleinere waarde van het koelvermogen (en het asvermogen). Dit verschijnsel wordt beheerst door het quotient van de warmtecapaciteit van de regeneratormassa en die van het zich erin bevindende gas; naarmate de waarde van het quotient kleiner is, zijn de afwijkingen van het lineaire gedrag groter. Het quotient nu wordt kleiner als de noemer groter wordt; dit is het geval bij verhoging van het drukniveau in de machine (of verlaging van de vriestemperatuur), aangezien dan de hoeveelheid gas in de regenerator toeneemt. Hiermee is het beschreven gedrag verklaard; quantitatieve berekeningen van het effect leverden een goede overeenstemming met de metingen.

Volgens deze verklaring kan men het verschijnsel beperken door de warmtecapaciteit per cm³ van de regeneratormassa groot te kiezen. Deze eis staat naast die van de klassieke regeneratortheorie (zie [3])), volgens welke de warmtecapaciteit van de g e h e l e regenerator een bepaalde waarde moet overschrijden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Na deze voorbereidingen kunnen wij de koelmachine behandelen die in het laboratorium te Eindhoven ontwikkeld is. De manier waarop bij deze machine de volumevariaties tot stand gebracht worden verschilt enigszins van de in I behandelde. Dit type machine wordt een „verdringermachine" genoemd; wij beginnen met een beschrijving van het principe ervan.

De verdringermachine

Het is gebleken dat het verdringermechanisme, dat vanouds voor heteluchtmachines gebruikt is, voor de koudgaskoelmachine enkele bijzondere merites bezit. Het principe wordt verduidelijkt door *fig. 5*. De volumevariaties worden nu niet verkregen met behulp van twee betrekkelijk gelijkwaardige zuigers, maar met een „hoofdzuiger" en een hulpzuiger, de zg. „verdringer". De hoofdzuiger *1* beweegt in een cylinder *2* en varieert het volume

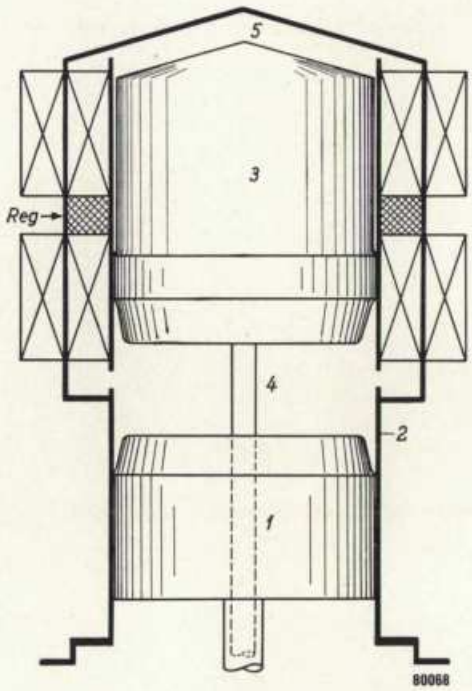


Fig. 5. Het principe van de verdringermachine. *1* = hoofdzuiger, die beweegt in cylinder *2*. *3* = verdringer, die het gas periodiek heen en weer doet stromen tussen de ruimten *4* en *5*. Het gas doorstroomt daarbij de ringvormige, om de verdringer gelegen, warmteuitwisselaars.

van de gehele „werkruimte". Deze werkruimte wordt door de verdringer *3*, die evenals de hoofdzuiger harmonisch beweegt, verdeeld in de ruimte *4* tussen de hoofdzuiger en de verdringer, en de ruimte *5* boven de verdringer; deze ruimten variëren dus ook harmonisch. De faze van de beweging van de verdringer wordt zodanig gekozen dat de ruimte *4* in faze achter is ten opzichte van ruimte *5*, zodat de ruimte *4* de compressieruimte is en *5* de expansieruimte (zie I); dit is verduidelijkt in *fig. 6*. De ruimten *4* en *5* staan, via de om de verdringer

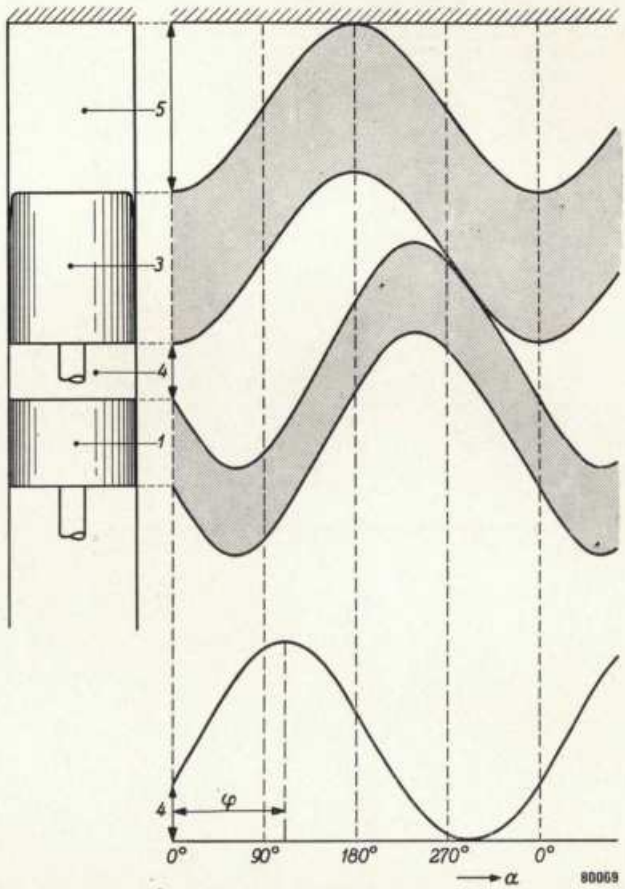


Fig. 6. Variatie van de volumina der ruimten *4* en *5* van fig. 5, als functie van de krukhoek α. De onveranderlijke ruimten die door het verdringerlichaam (*3*) en het lichaam van de hoofdzuiger (*1*) worden ingenomen, zijn geschaduwd. Onderaan is het volume van de ruimte *4*, tussen verdringer en hoofdzuiger, nog eens afzonderlijk uitgezet, om de sinusvormige variatie ervan en de optredende fazeverschuiving φ ten opzichte van ruimte *5* te laten zien.

gelegen ringvormige warmteuitwisselaars, met elkaar in open verbinding. De gasdrukken boven en onder de verdringer zijn dus vrijwel aan elkaar gelijk (vandaar de naam „verdringer"). Dit heeft tot gevolg dat de gaslek uit de expansieruimte, en dus ook het daarmee gepaard gaande koudeverlies, zeer klein is; dit vormt een belangrijk voordeel van het verdringertype. Bij een machine met twee normale zuigers is dit koudeverlies veel groter, daar over deze zuigers veel grotere drukverschillen optreden. Een ander voordeel van de verdringermachine is het geringere mechanische verlies, wegens het kleine wrijvingsverlies van de verdringer.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Beschrijving van de koelmachine

De machine is geschetst in *fig. 7*. Men vindt hierin de reeds genoemde onderdelen met dezelfde letters. De zuiger wordt via twee parallelle drijfstangen *6* aangedreven door de krukken *7* van de krukas *8*. De stang *9* van de verdringer is door het hart van de hoofdzuiger naar de krukkast geleid, en daar via de verdringerdrijfstang *10* met een derde kruk *11* van de krukas verbonden. De hoek tussen de krukken *7* en *11* is zodanig gekozen dat de beweging van de verdringer de juiste faze ten opzichte van die van de zuiger heeft. Het gas stroomt uit de compressieruimte door poorten *12* naar de ruimte waarin de koeler, de regenerator en de vriezer geplaatst zijn; de bovenzijde van de vriezer staat in verbinding met de expansieruimte.

De verdringer is opgebouwd uit het verdringerlichaam *16* en de „dop" *17*. Het verdringerlichaam bevat de zuigerveren en past als een normale zuiger in de cylindervoering; het bezit ongeveer de temperatuur van deze voering, die door koelwater omstroomd wordt. De dop is gemaakt van een materiaal dat de warmte slecht geleidt en is gevuld met een luchtige massa om gasstromingen in de dop te beperken; tussen de dop en de cylinderwand is een nauwe spleet aanwezig, zodat de dop de cylinderwand niet raakt. Door deze maatregelen is het koudeverlies door geleiding naar de warme delen van de machine sterk beperkt.

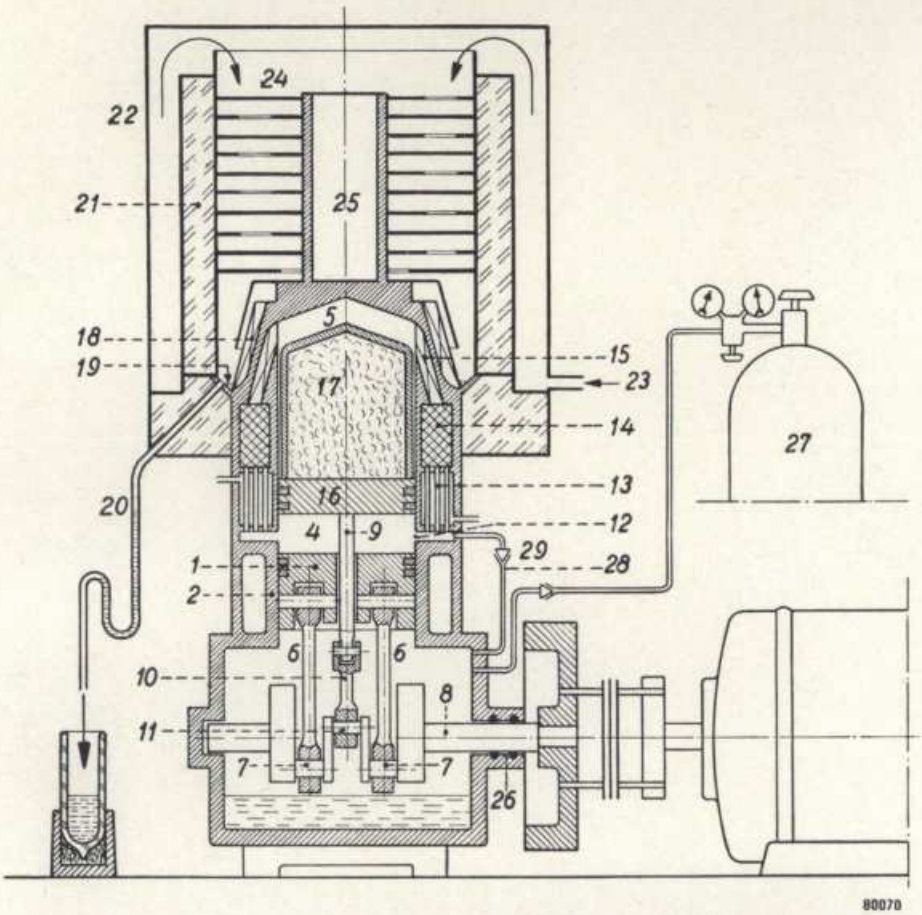


Fig. 7. Vereenvoudigde doorsnede van een koudgaskoelmachine, geconstrueerd voor het vloeibaar maken van lucht. De letters *1-5* hebben dezelfde betekenis als in fig. 5. Verder zijn: *6* = twee parallelle drijfstangen met krukken *7* van de hoofdzuiger. *8* = krukas. *9* = stang van de verdringer met drijfstang *10* en kruk *11*. *12* = poorten. *13* = koeler. *14* = regenerator. *15* = vriezer. *16* = lichaam en *17* = dop van de verdringer. *18* = condensor voor de vloeibaar te maken lucht, met ringvormig kanaal *19*, aftapbuis (zwanenhals) *20*, isolerend scherm *21*, omhulsel *22*. *23* = intree-opening voor de lucht. *24* = platen van ijsafscheider, die door buis *25* in contact staan met de vriezer (*15*). *26* = asafdichting. *27* = voorraadfles. *28* = suppletieleiding met terugslagklep *29*.

Deze constructie, welke in principe reeds bij de oudste heetgasmotoren toegepast werd, is een elegante oplossing voor het probleem hoe men met een bewegende zuiger een koude ruimte moet afsluiten zonder dat koudeverlies optreedt, waarbij de afdichting bij de omgevingstemperatuur plaats vindt. Het is merkwaardig dat de ontwerpers van de eerste expansiemachines voor de liquefactie van lucht deze oplossing niet hebben toegepast, aangezien zij dan vele moeilijkheden vermeden zouden hebben.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De buitenzijde van de vriezer is de „condensor" *18*, waartegen de lucht kan condenseren. De vloeibare lucht wordt verzameld in een ringvormig kanaal *19* en via een buis *20* afgetapt. De condensor is omgeven door een isolerend scherm *21* en het omhulsel *22*. De verse lucht treedt binnen door de waterdamp en het koolzuur, zodat de condensor *18* niet door ijs verontreinigd wordt.

De volledige machine is afgebeeld in *fig. 8*. *Fig. 9* geeft een foto van de koeler, de regenerator en de „kop". Hier volgen nog enige bijzonderheden over de machine.

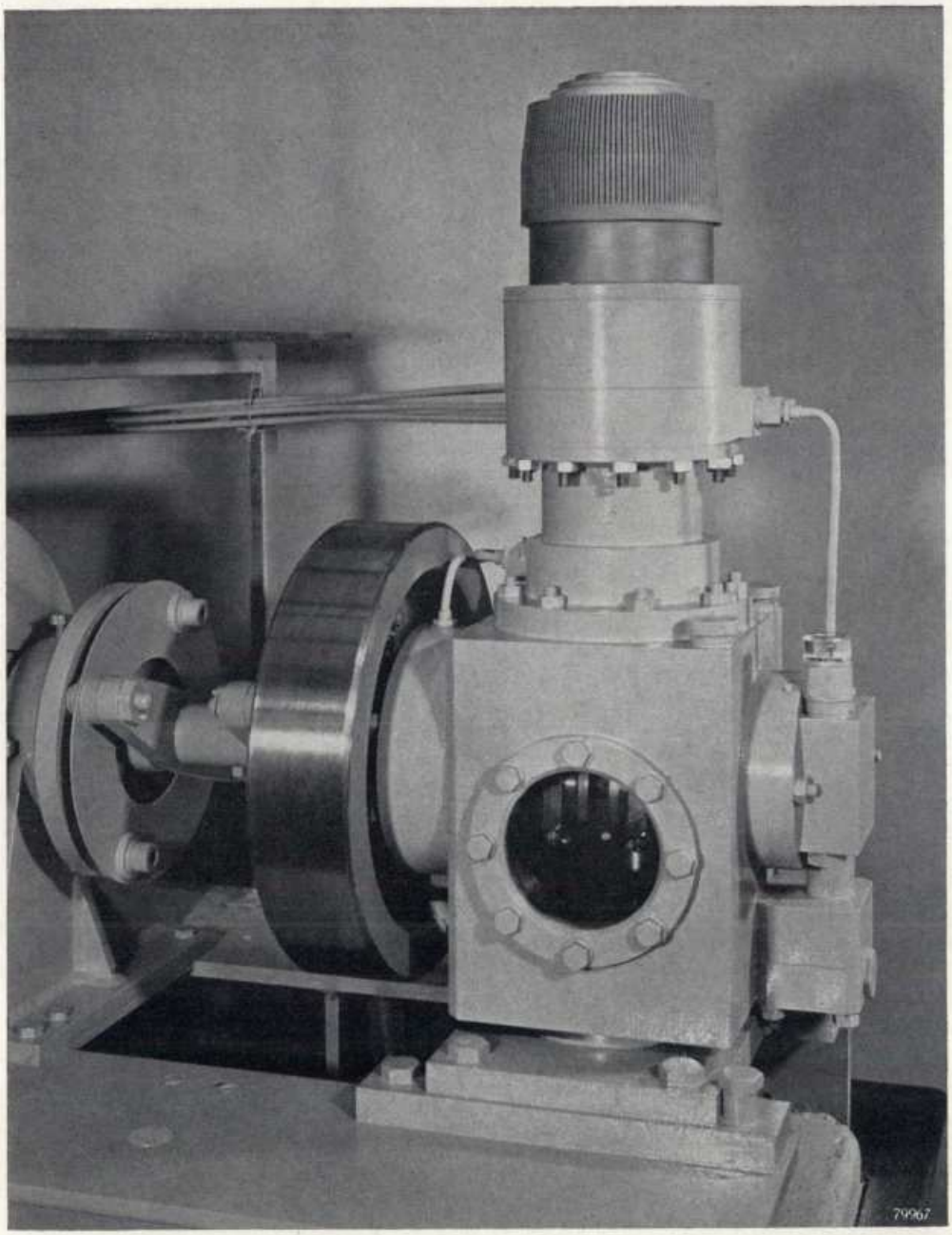


Fig. 8. De Philips koudgaskoelmachine. Om de condensor zichtbaar te maken, is de ijsafscheider verwijderd (vgl. de titelfoto).

opening *23* en stroomt door gaten in de platen *24*, die door een buis *25* in warmtegeleidend contact met de vriezer staan. Op deze koude platen (de „ijsafscheider") bevriezen de in de lucht aanwezige

Constructieve bijzonderheden

De krukkast is gesloten en gevuld met het gas dat als werkmedium in de machine dienst doet; de gasdruk is ongeveer gelijk aan p_{min} in de werkruimte.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

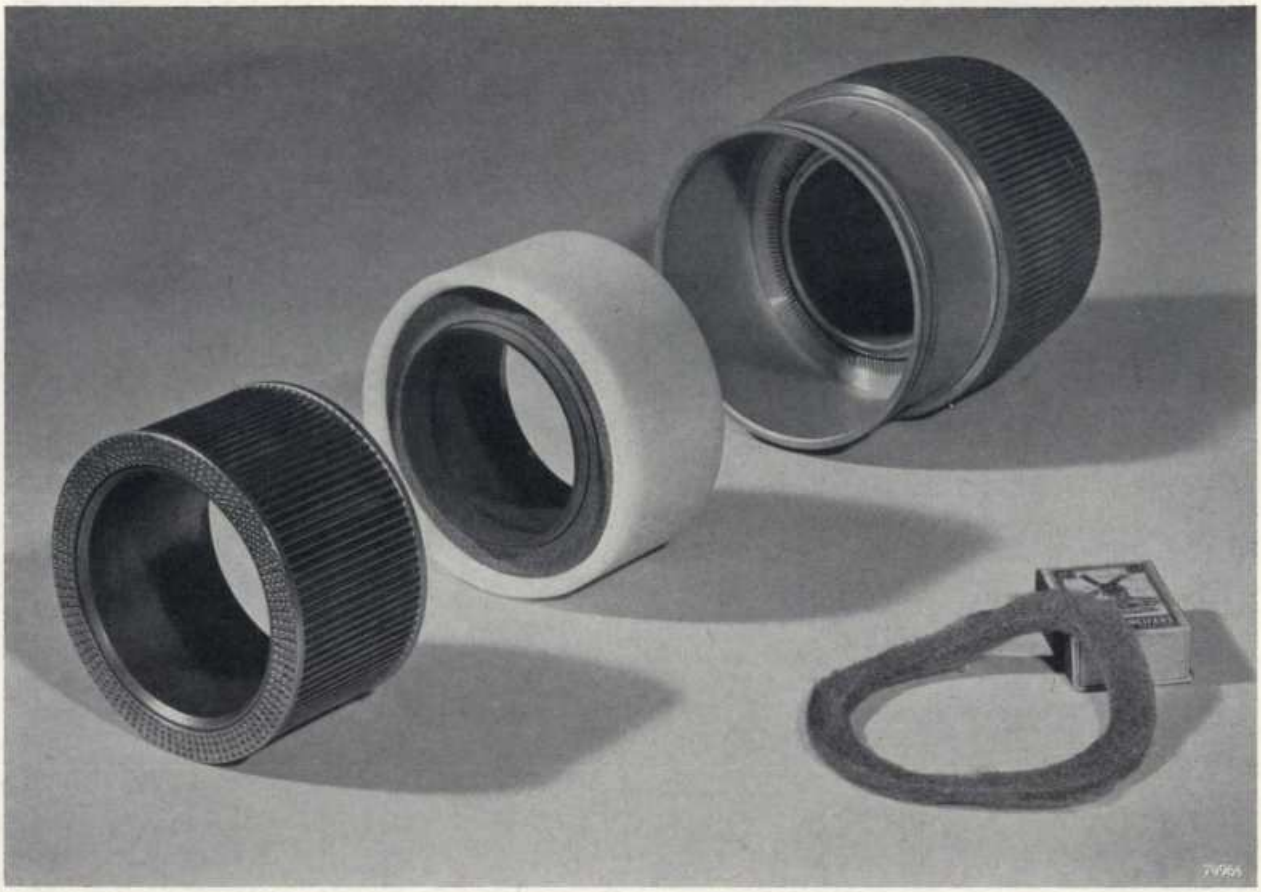


Fig. 9. Van voren naar achteren: koeler, regenerator en vriezer van de koudgaskoelmachine.
De koeler is opgebouwd uit een groot aantal dunne buisjes, die evenwijdig aan de hartlijn van de machine liggen. Het werkende medium stroomt door de buisjes, het koelwater eromheen; dit water koelt tevens het gedeelte van de cylinderwand waarlangs de verdringer beweegt (zie fig. 5 en 7).
De regeneratormassa bestaat, evenals bij de heetgasmotor, uit zeer fijn metaaldraad. Enkele ringen uit deze massa (zie de afzonderlijke ring rechts) worden op elkaar gestapeld en in de vorm gehouden door twee concentrische ringen van een materiaal dat de warmte slecht geleidt (in casu nylon). Ook de buitenwand van de machine hier ter plaatse moet in axiale richting de warmte slecht geleiden (ter vermijding van „kortsluiting" van de regenerator). Hij is hier derhalve van een sterke, de warmte slecht geleidende staalsoort gemaakt, die bij zeer geringe wanddikte toch de druk in de machine kan weerstaan.
De vriezer bestaat uit een groot aantal zeer fijne spleten, die gezaagd zijn in het volle materiaal aan de binnenzijde van de kop. Aan de buitenzijde van de kop zijn voor de warmteuitwisseling met de vloeibaar te maken lucht eveneens een groot aantal spleten gezaagd. De kop is gemaakt van koper, om een zo gering mogelijk temperatuurverschil tussen de buitenkant en het inwendige van de machine te waarborgen.

De krukas is via een asafdichting (fig. 7, *26*) naar buiten gevoerd. Het vulgas wordt uit de voorraadfles *27* naar de krukkast gebracht; vandaar voert de leiding *28* met de terugslagklep *29* naar de werkruimte. Telkens wanneer ten gevolge van gaslek langs de hoofdzuiger (waardoor het drukniveau in de werkruimte lager wordt) p_{min} beneden de druk in de krukkast gedaald is, stroomt het gas door de leiding *28* naar de werkruimte terug. De machine is in principe gasdicht; slechts wanneer door een toevallig lek de gasdruk te veel gedaald is, moet uit de voorraadfles vers gas nageleverd worden.

De krukkast moet betrekkelijk zwaar geconstrueerd worden om bestand te zijn tegen de hoge gasdruk; hiertegenover staan echter belangrijke voordelen ten opzichte van een krukkast met atmosferische druk. Met p_{min} in de krukkast is nl. het op de hoofdzuiger werkende drukverschil veel geringer (variërend tussen 0 en $p_{max} - p_{min}$, bij atmosferische druk daarentegen tussen p_{min} en p_{max}), zodat de krachten op het drijfwerk kleiner zijn en eveneens de wrijvingsverliezen. De gaslek langs de zuiger is ook kleiner; bovendien kan het weggelekte gas automatisch in de werkruimte teruggevoerd worden, wat anders niet mogelijk is. Ten slotte wordt hiermee de mogelijkheid geopend het weglekken van gas uit de machine drastisch te beperken, aangezien een as-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

afdichting volkomen gasdicht kan zijn, wat bij een zuiger moeilijk bereikt kan worden.

Een bijzonder lastig probleem werd gevormd door de eis dat de werkruimte geheel vrij van olie moet zijn, omdat de olie in de koude delen van de regenerator bevriest en deze verstopt. Na een uitvoerig onderzoek is het gelukt aan de zuiger een zodanige vorm te geven dat, ondanks voldoende smering van de wrijvende delen, geen olie naar de werkruimte getransporteerd wordt. Dit onderwerp blijve gereserveerd voor een afzonderlijk artikel.

De buis waardoor de vloeibare lucht afgetapt wordt heeft de vorm van de bekende „zwanenhals", waardoor een vloeistofafdichting verkregen wordt. Hierdoor kan langs deze weg geen onzuivere lucht de condensor bereiken en deze verontreinigen. Bovendien kan de vloeistof afgetapt worden, ondanks het feit dat de gasdruk om de condensor wat lager is dan die van de omringende atmosfeer ten gevolge van de stromingsweerstand tussen de inlaatopening en de condensor; de vloeistof in de buis *20* gaat alleen hoger staan dan het hoogste punt van de zwanenhals. Het gevolg hiervan is dat verse lucht naar binnen gezogen wordt, en wel slechts zoveel als door de machine kan worden gecondenseerd (dus overeenkomstig het koelvermogen). *Er zijn dus geen extra hulpmiddelen nodig om de lucht langs de condensor te voeren; de machine zuigt de juiste hoeveelheid zelf aan.* Hierdoor wordt tevens automatisch de temperatuur van de condensor gefixeerd op het condensatiepunt van atmosferische lucht, dit is —194 °C. Men ziet hier duidelijk de grote eenvoud van de installatie, die het gevolg is van het feit dat de lucht bij atmosferische druk gecondenseerd wordt.

Gegevens en resultaten

In het volgende lijstje vindt men een aantal gegevens over de machine:

Boring van de cylinder	=	70 mm
Slag van de zuiger	=	52 mm
Toerental	=	1440 omw/min
p_{max}	=	35 kg/cm²
p_{min}	=	16 kg/cm²
p_{max}/p_{min}	=	2,2.

Als vulgas wordt waterstof of helium gebruikt; lucht is hier niet bruikbaar omdat deze bij een druk van 35 kg/cm² reeds bij —144 °C condenseert.

In het laboratorium zijn de volgende resultaten gemeten bij een koelwatertemperatuur van 15 °C:

Opbrengst	bij droge lucht . . .	5,8 kg/uur
	bij vochtige lucht . . .	4,8-5,8 kg/uur
Asvermogen		5,8 kW
Specifiek asvermogen [5]		1,0 kWh/kg
Aanlooptijd		ca. 13 minuten
Onafgebroken werkperiode	bij droge lucht . .	enkele dagen
	bij vochtige lucht [6]	20-30 uur.

Fig. 10 toont de meetresultaten voor hogere vriestemperaturen; in de figuur is ook een kromme voor de „kwaliteitsfactor" getekend (vergelijk fig. 2).

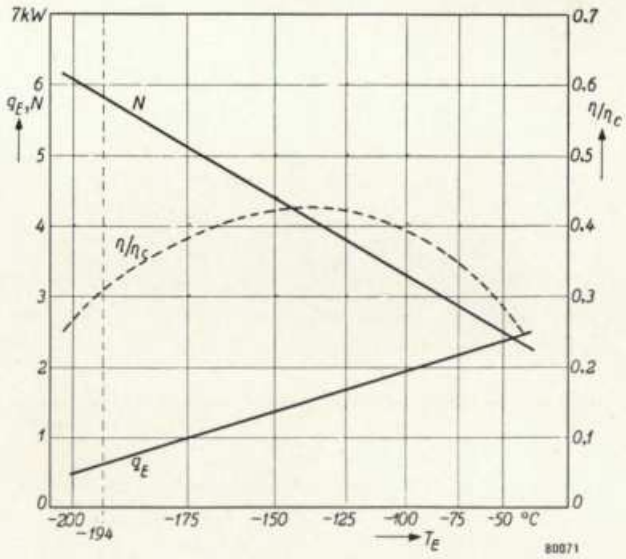


Fig. 10. Gemeten asvermogen N en koelvermogen q_E van de koudgaskoelmachine als functie van de vriestemperatuur T_E. De hieruit afgeleide „kwaliteitsfactor" η/η_C (vgl. fig. 2) is eveneens uitgezet.

De waarde van het specifieke asvermogen, dat een maat is voor het rendement, vraagt nog enige toelichting. In de literatuur vindt men voor het specifieke asvermogen van liquefactoren getallen die een grote spreiding vertonen. Bij zeer grote installaties (met een productie van 100-1000 kg/uur) bereikt men met expansieturbines een specifiek asvermogen van ongeveer 0,7 kWh/kg; voor kleine installaties (productie enkele kg/uur) liggen de cijfers tussen 1,5 en 3,0 kWh/kg. Men ziet dat het rendement van de koudgaskoelmachine, ondanks de kleine capaciteit, het rendement van de grote installaties nabij komt.

---

[5]) Deze maat voor het „rendement" van de installatie is algemeen ingeburgerd bij opgaven over liquefactoren; om verwarring te voorkomen, hebben wij voor deze grootheid, die gelezen kan worden als kW per kg lucht per uur, de uitdrukking specifiek asvermogen ingevoerd. De opgegeven waarde heeft betrekking op het vloeibaar maken van droge lucht.

[6]) De werkperiode wordt hier bepaald door het volume van de ijsafscheider. Wanneer deze verstopt is, moet hij ontdooid worden; dit vergt, inclusief de nieuwe aanlooptijd, 1 uur.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het is in dit bestek niet mogelijk de oorzaken van dit relatief hoge rendement te analyseren; wij zouden dan het koudgaskoelproces moeten vergelijken met de bestaande methodes, die hiervan echter sterk verschillen. Wij kunnen twee punten noemen die zeker in de juiste richting werken. Ten eerste is de drukverhouding ($\approx 2{,}2$) klein, zodat de adiabatische verliezen (die bij andere systemen in de compressoren een rol spelen) klein zijn. Ten tweede wordt het bij de expansie vrijkomende vermogen uitzonderlijk eenvoudig, en derhalve met hoog rendement, teruggewonnen, nl. via de gasdruk die op de zuiger werkt.

Het rendement van het proces kan overigens nog belangrijk verbeterd worden. De koude die de machine levert wordt nl. voor niet minder dan de helft gebruikt voor het afkoelen van de lucht; de rest dient voor de condensatie. Men kan nu met een tweede koelmachine de lucht tot een tussengelegen temperatuur voorkoelen, zodat een deel van de nodige koude met een hoger rendement wordt verkregen (fig. 10) en het totale rendement stijgt. Berekening leert dat met een dergelijke tussentrap het specifieke asvermogen minder dan 0,8 kWh/kg zal kunnen zijn.

Behalve in rendement onderscheidt de machine zich ook gunstig van de bekende typen door de grote eenvoud van de bediening en de ongevoeligheid voor vervuiling (geen expansiekranen e.d.). Een bijkomstig voordeel is dat de vloeibare lucht volkomen vrij van olieresten is, omdat de lucht niet gecomprimeerd behoeft te worden. Bovendien zal het feit dat het koelvermogen niet alleen gevarieerd kan worden door wijziging van het toerental, maar ook door wijziging van de gasdruk in de werkruimte, in vele gevallen een eenvoudige regeling mogelijk maken.

Wij besluiten dit artikel met een globaal overzicht van de toepassingsmogelijkheden van de koudgaskoelmachine. Na het voorgaande is het duidelijk dat de machine in laboratoria en fabrieken een nuttige rol zal kunnen vervullen voor de productie van vloeibare lucht. Bij laboratoriumgebruik zal het aangenaam zijn dat men met de machine ook andere gassen vloeibaar kan maken, zoals stikstof, argon, zuurstof of methaan, waarmee men zich op eenvoudige wijze vloeistofbaden met een goed gedefinieerd kookpunt kan verschaffen. Bij voorlopige proefnemingen is gebleken dat de machine in bepaalde gevallen ook met vrucht bij gasscheiding toegepast kan worden, bijv. voor het splitsen van lucht. Ten slotte kan men haar ook gebruiken als voorkoeler voor waterstof, als men deze op kleine schaal met een normale Linde-liquefactor vloeibaar wil maken *).

Het beste werkgebied van de machine ligt, zoals reeds meermalen opgemerkt werd, tussen —80 °C en —200 °C, waar zij kan dienen als een bron van koude, die voor elk doel gebruikt kan worden. Zij heeft daar een goed rendement (zie fig. 10) en is veel minder gecompliceerd dan de cascademachine, die tot nu toe in dit gebied toegepast werd. Bovendien is het een groot voordeel dat met één machine elke temperatuur in dit gebied even gemakkelijk bereikt kan worden. Men mag daarom verwachten dat de koudgaskoelmachine het materiaalonderzoek en de toepassing van allerlei processen bij deze temperaturen zal stimuleren.

*) Zie in dit nummer, blz. 86. *Red.*

Samenvatting. Bij de realisatie van het koudgaskoelproces treden verliezen op, waarvan sommige in hoofdzaak het asvermogen vergroten (mechanisch verlies en zg. adiabatisch verlies), andere in hoofdzaak het koelvermogen verkleinen (isolatieverlies en regeneratieverlies). De eerstgenoemde verliezen stellen een bovenste grens, de laatstgenoemde een onderste grens aan het temperatuurgebied waarin de koudgaskoelmachine goed bruikbaar is (van —80 °C tot —200 °C). Na een beknopte bespreking van deze en andere verliezen en hun kwantitatieve betekenis, worden in dit artikel de factoren besproken die van invloed zijn op het ontwerp van zulk een machine. Van groot practisch belang is, dat men het volume van een koudgaskoelmachine voor gegeven koelvermogen drastisch kan beperken door een hoog drukniveau te kiezen. Er wordt een kleine machine nader beschreven, waarvan de druk tussen 16 en 35 kg/cm² varieert, bij een toerental van 1440 omw/min. Deze machine, die geconstrueerd is volgens het verdringerprincipe, dat ook bij de heetgasmotor vanouds is toegepast, wordt gebruikt voor het vloeibaar maken van lucht. Door het feit dat de lucht hier niet voorgecomprimeerd behoeft te worden, is deze liquefactor zeer eenvoudig geworden en gemakkelijk te bedienen. Hij heeft een opbrengst van ca. 5,5 kg vloeibare lucht per uur en het „specifieke asvermogen" bedraagt 1,0 kWh per kg vloeibare lucht — een waarde die voor zulk een kleine en eenvoudige machine uitzonderlijk laag is en hier overigens zonder grote moeite nog verder kan worden verkleind. Tot slot worden de eigenschappen en verdere toepassingsmogelijkheden van de beschreven koudgaskoelmachine besproken.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

SCHAKELINGEN VOOR HET BEPROEVEN VAN THYRATRONS

I. HET METEN VAN DE ROOSTERSTROOM

door M. W. BROOKER *) en D. G. WARE *).

621.387:621.385.38

In de reeks van thyratrons die tegenwoordig in de handel zijn, vindt men types voor hoge spanningen en sterke stromen. Wil de fabrikant deze buizen grondig beproeven onder volle belasting, dan stuit dit, indien het op de gewone wijze zou gebeuren, veelal af op een te zware belasting van het net. Om deze reden heeft men getracht schakelingen te bedenken die de toestand van volle belasting nabootsen, zodanig dat nog maar een fractie van het vermogen en de energiekosten nodig zijn.

In het onderstaande deel I van hun artikel beschrijven de auteurs een „fopschakeling" waarmee men de roosterstroom kan meten die vloeit juist voordat de buis wordt ontstoken. De roosterstroomwaarde op dit ogenblik geeft een belangrijke aanwijzing omtrent de kwaliteit van de buis. Deel II zal gaan over een ander soort fopschakeling, bestemd voor het doen van levensduurproeven met thyratrons.

In een hoogvacuumtriode met onverzadigde emissie wordt de anodestroom voornamelijk begrensd door een ruimtelading van electronen. Deze ruimtelading kan men besturen door de negatieve potentiaal van het rooster te variëren. In een triode met gasvulling (thyratron) evenwel heeft men een dergelijke bestuurbaarheid niet; het rooster werkt er slechts als een „trekker" die het ogenblik van ontsteken bepaalt, hetgeen ook een bestuurbaarheid betekent, zij het van enigszins andere aard dan bij een vacuumbuis. Zodra men de aangelegde negatieve roosterspanning tot een bepaalde waarde vermindert, begint er anodestroom te lopen; de voortgebrachte ionen neutraliseren de door electronen gevormde ruimtelading, en de anodestroom neemt snel toe tot de waarde die de kringparameters voorschrijven. Dit proces is bekend als de ontsteking van de buis. Is een thyratron eenmaal ontstoken, dan heeft het rooster geen invloed meer op de anodestroom, daar het wordt afgeschermd door een laag positieve ionen.

Verkeert een thyratron in de niet-geleidende toestand, met een negatieve voorspanning op het rooster, dan zal er wel een roosterstroom lopen. Dit is te wijten aan verschillende effecten, die we straks zullen verklaren. Deze vóór het ontsteken al aanwezige roosterstroom loopt door de roosterweerstand en kan zodoende de nauwkeurigheid bederven waarmee de buis bestuurbaar is. Zelfs kan de buis, indien de roosterstroom vrij groot is en de roosterweerstand hoog, geheel onbestuurbaar worden. Daarom is het nodig dat men beschikt over een nauwkeurige methode om de genoemde roosterstroom te meten. Dit geldt zowel voor de ontwerper van thyratrons, die het effect van constructiewijzigingen wil nagaan, als voor de fabrikant, die de kwaliteit van zijn product wil controleren.

In hetgeen volgt geven we eerst een overzicht van enige bekende methodes voor het meten van de roosterstroom in thyratrons; daarna beschrijven we betere methodes, die eenvoudig in het gebruik zijn en waarmee de roosterstroom kan worden bepaald onder omstandigheden die identiek zijn met die van normaal werken onder volle belasting.

Gebruikelijke methodes voor het meten van de roosterstroom

De roosterstroom van een nog niet ontstoken thyratron kan men ontleed denken in de volgende componenten:

1) een lekstroom tussen de electrodes, te wijten aan onvolkomen isolatie,
2) een stroom van zich naar het rooster begevende positieve ionen, ontstaan door botsingen van de gasatomen met electronen die aan de invloed van het rooster ontsnapt zijn („onbestuurde kathode-emissie"),
3) primaire thermische emissie van het rooster zelf, en eventueel
4) foto-emissie van het rooster.

Sommige van deze componenten kan men afzonderlijk meten. Zo kan bijv. de lekstroom afzonderlijk worden bepaald met gewone meetmethodes voor isolatieweerstanden. De stroom die te

*) Mullard Radio Valve Co., Mitcham, Engeland.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

wijten is aan onbestuurde kathode-emissie kan men meten door in de roosterketen een micro-ampèremeter op te nemen en de anode op de als maximum toegelaten spanning te brengen; men kan dan de roosterstroom opnemen als functie van de roosterspanning. (De micro-ampèremeter moet beschermd zijn tegen overbelasting, daar de roosterstroom sterk toeneemt wanneer de buis wordt ontstoken.) Maar wat men eigenlijk wil weten, is de totale roosterstroom, van alle oorzaken tezamen, zoals deze is bij normaal werken. In het verwezenlijken van deze toestand zit de voornaamste moeilijkheid.

De grondslagen van enige bekende methodes die men voor de roosterstroommeting toepast, zijn de volgende.

De schakelaarmethode

Een meetinrichting volgens de zg. schakelaarmethode is gemakkelijk in elkaar te zetten en eenvoudig in het gebruik, maar ze geeft niet meer dan een benaderend idee van de roosterstroom bij normaal werken.

De gang van zaken is deze dat men de buis, met een weerstand als belasting en met de grootste toelaatbare gemiddelde waarde van de anodestroom, zo lang laat werken dat alle electrodes hun werktemperatuur bereikt hebben. Dan wordt, door middel van een schakelaar, de belasting afgeschakeld, de anode met de kathode verbonden en een spanning van bijv. —100 V over een micro-ampèremeter aan het rooster gelegd. De stroom die men dan op deze meter afleest, wordt „de" roosterstroom genoemd.

De voordelen van deze methode zijn klaarblijkelijk deze: ze kan worden toegepast op thyratrons van ieder type, en er is geen kostbare installatie voor nodig. Maar ook is gemakkelijk in te zien dat er de volgende nadelen aan zijn verbonden:

1) de waargenomen stroom wordt snel kleiner, doordat de electrodes van de buis afkoelen;
2) een eventuele lekstroom wordt niet juist gemeten, want de anode- en de roosterspanning hebben een abnormale waarde;
3) onbestuurde kathode-emissie is afwezig;
4) ionisatie afkomstig van emissie van andere electrodes, zoals schermen en de anode, is eveneens afwezig.

De afknijpmethode

In de Verenigde Staten wordt algemeen de volgende, zg. afknijpmethode gebruikt. Gevoed uit een wisselstroomnet van bijv. 220 V, werkt de buis op een belastingsweerstand, die zo wordt ingesteld dat de gemiddelde anodestroom de grootste toegelaten waarde heeft wanneer de buis telkens een volle halve periode stroom doorlaat. Nadat de buis lang genoeg heeft gewerkt om in temperatuurevenwicht te komen, maakt men de roosterspanning meer en meer negatief, totdat de buis juist niet meer herontsteekt, en men noteert de spanning V_{g1} (gemeten vóór de roosterserieweerstand) die bij dit afknijppunt behoort. Men doet dit eerst met een lage, dan met een hoge waarde van de roosterweerstand (R_{g1}, R_{g2}). Noemen we de kritische roosterstroom, die bij het afknijppunt optreedt, $I_{g\,krit}$, dan is de kritische spanning aan het rooster zelf, als V_{g1} en V_{g2} de aflezingen van de voltmeter zijn: $V_{g1}-R_{g1}I_{g\,krit} = V_{g2}-R_{g2}I_{g\,krit}$. Hieruit volgt:

$$I_{g\,krit} = \frac{V_{g2} - V_{g1}}{R_{g2} - R_{g1}}. \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

Vergeleken met de vorige, heeft deze methode de volgende voordelen:

1) Gemeten wordt bij de normale kritische roosterspanning. De lekstroom die in het meetresultaat is begrepen, is dus juist.
2) Eventuele onbestuurde emissie wordt meegemeten, maar aangezien deze afhangt van de anodespanning, is het nodig de proef te doen bij de hoogste toegelaten anodespanning.
3) Roosteremissie wordt eveneens gemeten bij de juiste spanning.

Evenwel, deze methode laat niet toe dat de anodestroom de grootste toegelaten topwaarde bereikt, aangezien bij een halfsinusvormig stroomverloop de verhouding van de top- tot de gemiddelde waarde van de anodestroom maar iets groter dan 3 is, terwijl bij moderne thyratrons deze verhouding 10 en soms nog meer mag bedragen. Dit nadeel is belangrijk, omdat in het algemeen de boogspanning hoger is wanneer stromen met grote topwaarde worden doorgelaten; de buis wordt dan warmer en de roosterstroom groter.

Een ander nadeel is dat naarmate het afknijppunt wordt benaderd — doordat men de roosterspanning meer en meer negatief maakt — de oorspronkelijke halve sinussen van de stroomvorm inkrimpen tot kwartsinussen en de gemiddelde anodestroom dienovereenkomstig afneemt tot de helft van de beginwaarde. Nu moet men, om de afknijpspanning nauwkeurig te kunnen bepalen, het sterker negatief maken van de roosterspanning langzaam doen, maar daardoor koelt de buis tijdens de meting aanmerkelijk af. Het gevolg is dat de gemeten roosterstroom kleiner is dan de roosterstroom die bij volle belasting vloeit.

Nog een bezwaar is dit. Schakelt men over van

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

een lage naar een hoge roosterweerstand, dan wordt de ontsteking vervroegd, zodat de gemiddelde anodestroom groter wordt, wat de buis heter maakt en dus de roosterstroom doet toenemen. Gebleken is dat de roosterstroom soms zo snel verandert dat men, met hoge roosterweerstand, in het geheel geen stabiele toestand krijgt. Dit deed zich voor bij afgekeurde buizen, die een te grote roosterstroom vertoonden, maar een beproevingsinstallatie dient zo te zijn, dat men er ook dergelijke grote roosterstromen nog goed mee kan meten.

Gewijzigde afknijpmethode met tegenkoppeling

De nadelen van de normale afknijpmethode hebben aanleiding gegeven tot het zoeken naar een gewijzigde methode. Uitkomst heeft hier gebracht het aanbrengen van tegenkoppeling. Deze, door ons ontwikkelde, methode is van grote waarde gebleken in het beginstadium van het ontwikkelingswerk dat bij Mullard aan thyratrons is verricht.

Het principe is weergegeven in *fig. 1*. Als voedingsbron dient hier een wisselstroomnet van 220 V. In de roosterkring bevindt zich o.a. een bron van gestabiliseerde gelijkspanning, die met een potentiometer regelbaar is en met de positieve pool aan het rooster ligt. Een variabele belastingsweerstand R_1 is met de buis in serie geschakeld (aan de kathodezijde), en een aantal weerstanden R_g kunnen één voor één in de roosterkring worden geschakeld.

Wanneer er anodestroom loopt, dan ontstaat er een enkelfazig gelijkgerichte spanning over de belastingsweerstand R_1. Deze spanning wordt afgevlakt door een filter (L_1-C_1-L_2-C_2). De afgevlakte spanning is werkzaam in de roosterkring en tegengesteld gericht aan de bovengenoemde gestabiliseerde spanning. De afgevlakte spanning is de grootste van de twee, zodat er een negatieve roosterspanning resulteert; deze bepaalt de ontsteking van de buis en hangt lineair af van de gemiddelde anodestroom.

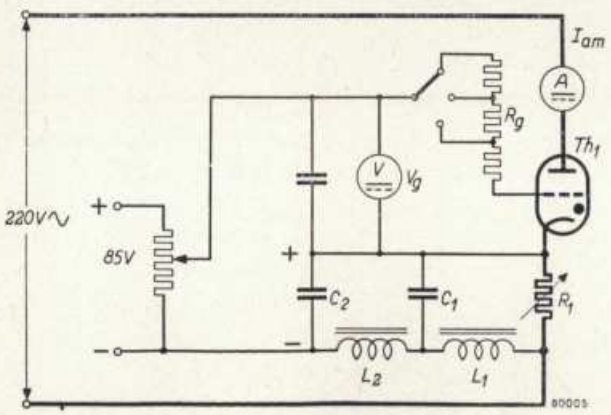


Fig. 1. Afknijpmethode voor het meten van de roosterstroom van een thyratron (Th_1), met tegenkoppeling. De gelijkspanning over de belastingsweerstand (R_1) wordt afgevlakt door een filter (L_1-C_1-L_2-C_2) en met negatieve polariteit teruggevoerd naar het rooster van Th_1, tegengesteld gericht aan de regelbare gelijkspanning die van een gestabiliseerde spanningsbron (85 V) wordt betrokken. De resulterende roosterspanning V_g is afleesbaar op een voltmeter, de gemiddelde anodestroom I_{am} op een ampèremeter. Met een schakelaar kunnen verschillende weerstanden R_g in de roosterkring worden geschakeld.

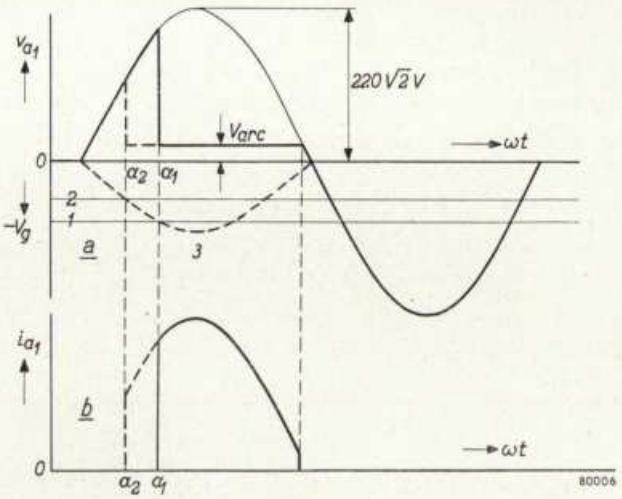


Fig. 2. Ter verklaring van de stabiliserende werking der tegenkoppeling in fig. 1. Stijgt de roosterspanning V_g van niveau *1* naar niveau *2*, dan neemt de ontstekingshoek (bepaald door het snijpunt met de gestippelde kromme *3*, die het verloop van de kritische roosterspanning weergeeft) af van α_1 tot α_2. Daardoor neemt de gemiddelde anodestroom I_{am} toe en V_g dus af. Dit werkt verandering van I_{am} tegen.

v_{a_1} is de spanning over Th_1, V_{arc} de boogspanning, i_{a_1} de anodestroom, t de tijd, $\omega = 2\pi \times$ netfrequentie.

De compenserende werking van deze schakeling blijkt uit *fig. 2*. Stel dat door een verandering van de stroom die door de roosterweerstand loopt, de roosterspanning stijgt van niveau *1* naar niveau *2*. De ontsteking wordt dus vervroegd — de „ontstekingshoek" α_1 wordt verkleind tot α_2 —, zodat de gemiddelde anodestroom en de gemiddelde spanning over R_1 toenemen. Er komt dus op het rooster een hogere negatieve spanning te staan, wat de ontsteking verlaat en dus stabiliserend werkt.

Dit stabiliserende effect maakt dat de buis stabiel met een constante anodestroom blijft werken, mits men de instelling niet zo maakt dat de buis wordt ontstoken in de buurt van de top van de anodespanning. Bij ontstekingshoeken groter dan ongeveer 80° kan de schakeling gaan oscilleren, als gevolg van de vertraging van het afvlakfilter.

Door deze methode worden de variaties van de gemiddelde anodestroom aanzienlijk verzwakt. De eenmaal ingestelde gelijkstroomwaarde blijft gedurende de meting practisch gehandhaafd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De resulterende roosterspanning wordt afgelezen op de voltmeter V_g in fig. 1, en de roosterstroom kan worden bepaald bij een ontstekingshoek van bijv. 45°, zoals boven beschreven bij de gewone afknijpmethode.

Het voornaamste voordeel van de gewijzigde afknijpmethode is dat de buis normaal blijft werken terwijl de meting geschiedt. Ook hier geldt echter het nadeel dat de verhouding van top- tot gemiddelde waarde van de anodestroom beperkt is, in dit geval tot ca. 5, de waarde die bij de grootste ontstekingshoek (80°) behoort [1]).

Men kan dit nadeel vermijden door op de roostergelijkspanning een wisselspanning (sinusvormig, of, beter nog, impulsvormig) te superponeren, terwijl het overige deel van de schakeling onveranderd blijft. Door de wisselspanning in faze te verschuiven, kan men ontstekingshoeken tot 180° verkrijgen, waarbij de anodestroom continu van maximum tot 0 regelbaar is en de verhouding van top- tot gemiddelde stroom grote waarden aanneemt.

In het volgende hoofdstuk wordt een methode beschreven die gebruik maakt van ontsteekimpulsen waarmee ook bij grote waarden van de verhouding top:gemiddelde de werking stabiel is.

[1]) Zoals uit een eenvoudige berekening volgt, wordt de verhouding van de top- tot de gemiddelde waarde van de anodestroom bij ontstekingshoeken α van 0 tot 90° gegeven door $2\pi/(1+\cos\alpha)$, en voor α van 90° tot 180° door $2\pi\sin\alpha/(1+\cos\alpha)$, zie *fig. 3*. Laatstgenoemde uitdrukking wordt oneindig voor $\alpha = 180°$.

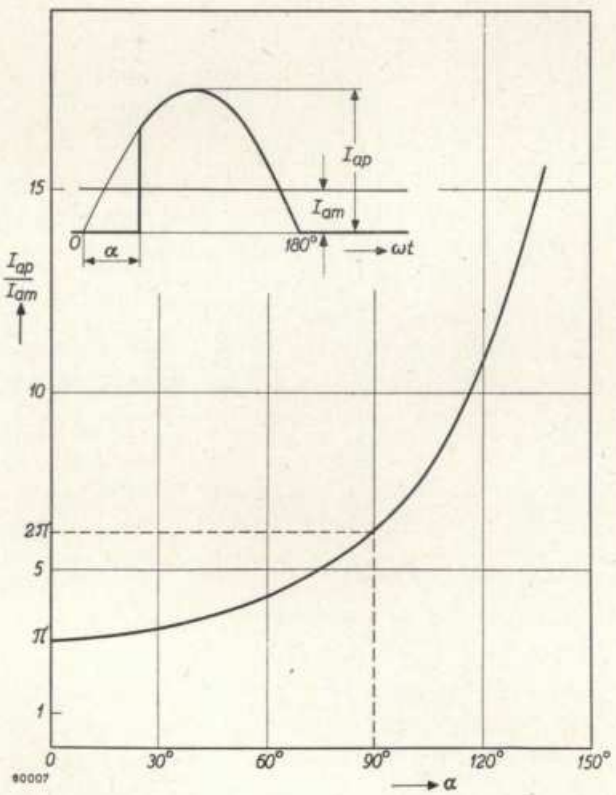


Fig. 3. Verhouding van de top- tot de gemiddelde waarde van de anodestroom, I_{ap}/I_{am}, als functie van de ontstekingshoek α.

„Fopschakeling"

Een bezwaar dat alle bovengenoemde methodes gemeen hebben — voor zover het thyratrons voor groot vermogen betreft —, is dat bij de proef het net zeer zwaar wordt belast, vooral wanneer spanningen veel hoger dan 220 V moeten worden gebruikt. Daarom heeft men getracht schakelingen te bedenken die de toestand van volle belasting nabootsen, doch het net met slechts een fractie van het volle vermogen belasten.

Dat zulke schakelingen mogelijk zijn, is te danken aan een karakteristieke eigenschap van thyratrons, namelijk het feit, dat zodra de buis wordt ontstoken, de spanning tussen anode en kathode een lage waarde aanneemt (boogspanning), die nagenoeg onafhankelijk van de stroom is (fig. 2). Voordat de buis is ontstoken, heeft de anodespanning een topwaarde van bijv. 1500 V, maar wanneer ze de volle anodestroom doorlaat, is de spanning minder dan 20 V, juist genoeg om de ionisatie te onderhouden. De buis blijft stroom doorlaten zolang de spanning niet beneden de boogspanning daalt.

Indien men dus een schakeling kan bedenken die, onmiddellijk nadat de buis bij hoge spanning is ontstoken, automatisch overschakelt van de hoge spanning op een lage, zal er nog maar een klein spanningsoverschot in de belastingsweerstand behoeven te worden opgenomen, zodat een aanzienlijke besparing wordt verkregen. Zulk een „fopschakeling" (de buis wordt als het ware beetgenomen, gefopt) is in het Engels bekend als „cheater circuit".

De door ons gebruikte fopschakeling kan voor allerlei proeven dienst doen. De gang van zaken is dezelfde als boven werd beschreven voor de afknijpmethode: de roosterstroom wordt afgeleid uit de verandering in de kritische roosterspanning die men, bij gegeven anodespanning, waarneemt wanneer men de weerstand in de roosterkring wijzigt. Ook hier wordt gewerkt met een regelbare gelijkspanning in de roosterketen, maar het ontsteken van de buis gaat anders. De buis wordt nu namelijk geëxciteerd met impulsen, waardoor ze betrouwbaar kan worden ontstoken op ieder punt van de halve periode waarin de anodespanning positief is. Deze impulsen bewerkstelligen eveneens het automatisch overschakelen, dat voor het „foppen" noodzakelijk is.

De hoofdzaken van de nieuwe schakeling zijn weergegeven in *fig. 4*. De buis waaraan men meet,

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Th_1, is aangesloten op een bron van 100 V wisselspanning, in serie met een belastingsweerstand R_1 en een hulpthyratron Th_2. De eerstgenoemde buis is ook, over een hoge weerstand R_2, verbonden met een bron van hoge wisselspanning. De wisselspanningsbronnen zijn zo geschakeld dat de punten a en b tegelijk positief zijn ten opzichte van c. In de roosterketen van Th_1 kunnen verschillende weerstanden R_g worden geschakeld.

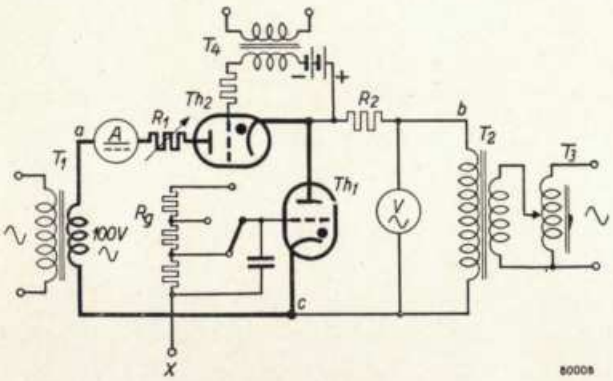


Fig. 4. Fopschakeling ter bepaling van de roosterstroom onder volle belasting. Th_1 thyratron waaraan men meet. Th_2 hulpthyratron. T_1 laagspanningstransformator (100 V). T_2 hoogspanningstransformator, gevoed uit de regelbare autotransformator T_3. R_1 belastingsweerstand. R_2 stroombegrenzende weerstand in de hoogspanningsketen. R_g roosterweerstanden. Ontsteekimpulsen worden toegevoerd bij X en ook aan de transformator T_4 (zie fig. 6).

Hoe het „foppen" in zijn werk gaat, kan het best worden uitgelegd met behulp van *fig. 5*. In fig. 5*a*, *b* en *c* is voorgesteld het verloop van de spanning v_{a1} over Th_1, de stroom i_{a1} door Th_1, resp. de spanning v_{a2} over Th_2. We beschouwen eerst Th_1. Zolang deze buis niet geleidt, is de spanning die erover staat, de hoge wisselspanning van de transformator T_2 (fig. 4). Wanneer nu een impuls de buis ontsteekt, bij het punt P, valt de spanning tot ongeveer 10 V; de hoge weerstand R_2 echter houdt de stroom op een kleine waarde, bijv. 10 mA. Beschouwen we nu Th_2. Gedurende de eerste helft van de spanningsperiode is de kathode van Th_2 positief ten opzichte van de anode van Th_2, zoals getekend is in fig. 5c, want de spanning van T_2 is veel hoger dan die van de transformator T_1. Buis Th_2 kan gedurende deze tijd dus geen stroom doorlaten. Wanneer echter Th_1 wordt ontstoken, verdwijnt de hoge positieve spanning aan de kathode van Th_2 (deze spanning wordt nu opgenomen door R_2). Buis Th_2 kan nu dus door dezelfde impuls als Th_1 worden ontstoken. De transformator T_1, van 100 V, gaat derhalve stroom leveren door Th_1, Th_2 en R_1. De weerstand R_1 is zo ingesteld dat de gemiddelde waarde van deze stroom de buis Th_1 vol belast. Vóór het ontsteken staat over Th_1 dus de hoge spanning van T_2 (met een top van bijv. $1000\sqrt{2}$ V), na het ontsteken loopt er de volle stroom door, die echter wordt geleverd door een bron van lage spanning (100 V), zodat het opgenomen vermogen klein is.

De roosterspanning voor Th_1 wordt geleverd door een schakeling die is voorgesteld in *fig. 6*. De voorspanning, die regelbaar is tot −100 V, wordt geleverd door een tweefazige gelijkrichter (niet getekend). De ontsteekimpuls, die een amplitude van 300 V en een duur van 50 μs heeft, wordt voortgebracht op de volgende manier. Een wisselspanning van ongeveer 50 V wordt gezet op het stuurrooster van een penthode Pe_1 met grote steilheid. Deze wisselspanning kan in faze worden verschoven door middel van een variabele weerstand R_3. De penthode wordt door een spanning van deze grootte sterk overbelast, zodat de anodestroom kanteelvormig wordt. Een differentiërende keten (C_4-R_4) leidt hieruit positieve en negatieve spanningsimpulsen af, die op het rooster van een thyratron (Th_3) werken (Mullard type 2 D 21). Deze

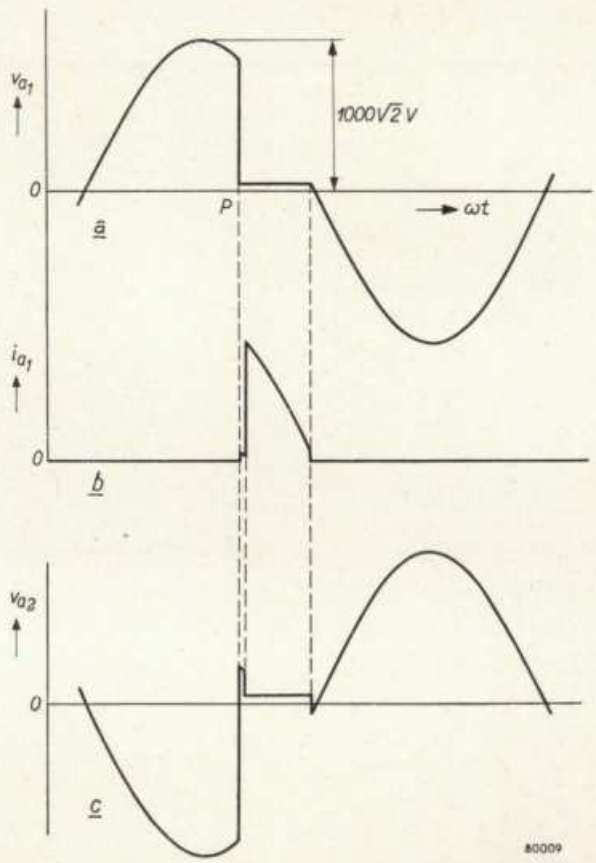


Fig. 5. Ter verklaring van de werking der fopschakeling van fig. 4.
a) Spanning v_{a1} (over de te beproeven buis), afkomstig van de hoogspanningsbron (hier 1000 V).
b) Stroom i_{a1} door de te beproeven buis.
c) Spanning v_{a2} over de hulpbuis.
Onmiddellijk voordat de te beproeven buis wordt ontstoken (bij P), is v_{a1} hoog. Het opgenomen vermogen is klein, dank zij het feit dat de stroom op een zeer kleine fractie na wordt betrokken uit de laagspanningsbron. (Terwille van de duidelijkheid is de figuur getekend alsof de hulpbuis iets later werd ontstoken dan de te beproeven buis.)

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

buis vormt een uitgangstrap met lage impedantie. Ze wordt door elke positieve impuls ontstoken en ontlaadt dan telkens een condensator (C_5) over een spoel (L_5) en een weerstand (R_5). De spanningsimpuls die daarbij over L_5-R_5 ontstaat, werkt via een scheidingscondensator (C_6) op het rooster van de te beproeven buis Th_1.

Het rooster van de hulpbuis Th_2 (fig. 4) heeft een vaste negatieve voorspanning en ontvangt de ontsteekimpuls die door de schakeling van fig. 6 wordt opgewekt, via een transformator (T_4).

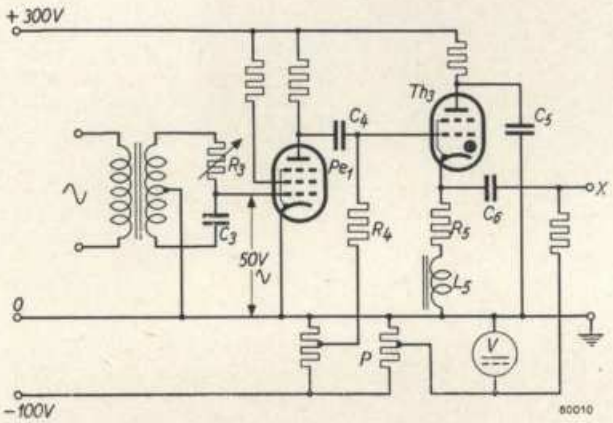


Fig. 6. Schakeling die de ontsteekimpulsen en de roostergelijkspanning voor de fopschakeling (fig. 4) levert.
Pe_1 penthode EF 91, met op het stuurrooster 50 V wisselspanning, die in faze regelbaar is (R_3-C_3). C_4-R_4 differentierende keten. Th_3 thyratron (Mullard 2 D 21) in de uitgangstrap. C_5 condensator, die zich over Th_3, R_5 en L_5 ontlaadt zodra Th_3 wordt ontstoken (L_5 bevordert dat Th_3 daarna wordt gedoofd). Daarbij ontstaat over R_5-L_5 een spanningsimpuls, die via een koppelcondensator (C_6) op het rooster van de te beproeven buis komt (bij X) en op dat van de hulpbuis (via transformator T_4, zie fig. 4). P potentiometer ter regeling van de roostergelijkspanning.

Meting van de vóór het ontsteken lopende roosterstroom

Onderstel dat een te beproeven buis in de zojuist beschreven installatie is geplaatst en door de impuls ontstoken wordt even nadat de anodespanning de topwaarde bereikt (ontstekingshoek $\alpha_1 > 90°$). Gelijktijdig wordt de hulpbuis Th_2 ontstoken, en de volle belastingsstroom gaat door Th_1 en Th_2 lopen. Vermindert men nu geleidelijk de negatieve voorspanning van Th_1, dan blijft de buis aanvankelijk aangaan bij de hoek α_1 die bepaald wordt door de impuls, totdat de voorspanning een waarde bereikt gelijk aan de kritische roosterspanning die behoort bij de top van de hoge wisselspanning. De ontsteking van Th_1 wordt dan plotseling vervroegd, van $\alpha_1 (>90°)$ tot 90°. De roostergelijkspanning waarbij dit gebeurt ($V_{g,90}$) wordt afgelezen op een voltmeter. Herhaalt men deze meting met een hogere roosterweerstand, dan vindt men een grotere waarde van $V_{g,90}$. Uit het verschil in roosterweerstand en het verschil in $V_{g,90}$ kan men met behulp van verg. (1) de roosterstroom afleiden die onmiddellijk vóór het ontsteken aanwezig was.

Fig. 7 illustreert het hele proces door middel van stroom- en spanningskrommen. Deze figuur maakt duidelijk wat precies gemeten wordt en wat het verschil met de vorige methodes is. Bij de vorige methodes werd de roosterstroom bepaald op het moment van ontsteken; de buis was op de goede werktemperatuur, maar de anodespanning had niet de grootste toegelaten topwaarde, en de ontstekingshoek kon principieel niet groter dan 90° zijn (practisch niet groter dan 80°). Zoals eerder werd opgemerkt, bereikt de verhouding van top- tot gemiddelde waarde van de anodestroom pas grote waarden bij grote ontstekingshoeken (fig. 3). Daardoor was het bij de vorige methodes niet mogelijk een buis te beproeven met tegelijk de hoogste toegelaten anodespanning, de grootste toegelaten gemiddelde en de grootste toegelaten topwaarde van de anodestroom, en het zijn juist deze omstandigheden die leiden tot maximale roosteremissie, lek en onbestuurde kathode-emissie — kortom tot de grootste roosterstroom.

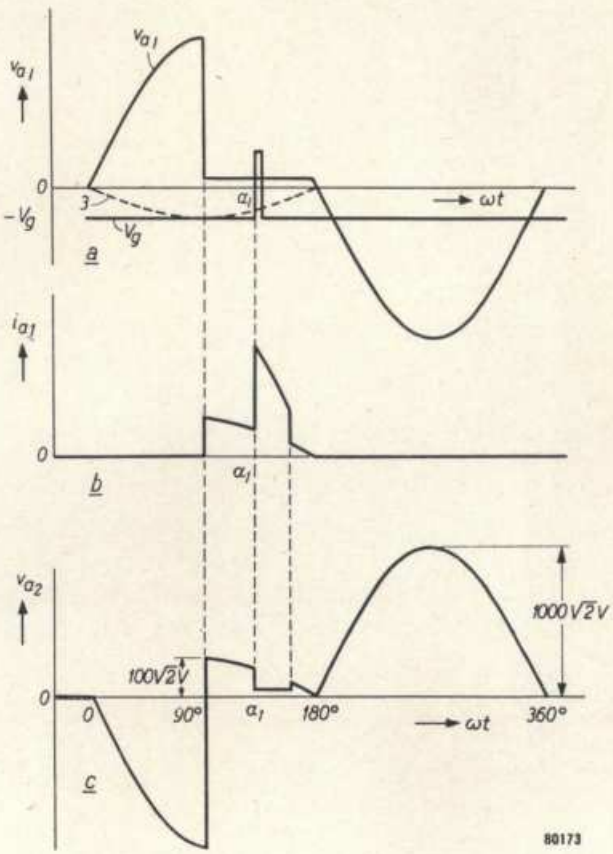


Fig. 7. Ter toelichting van de roosterstroombepaling met de fopschakeling van fig. 4.
In (*a*) is de voorspanning van de te beproeven buis (Th_1) zo ingesteld dat ze juist gelijk is aan de top van de kritische roosterspanning (kromme 3). Th_1 gaat dus aan bij de top van de hoge anodespanning (zie *b*). De hulpbuis (Th_2) wordt ontstoken door een impuls (ontstekingshoek $\alpha_1 > 90°$), zodat vanaf dit ogenblik de hoofdstroom kan gaan lopen (door beide buizen). De spanning v_{a_2} over Th_2 is weergegeven in (*c*).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De nieuwe methode heeft deze nadelen niet. De roosterstroom wordt noodzakelijkerwijs gemeten wanneer de anodespanning de topwaarde heeft, wat ook de verhouding van top- tot gemiddelde anodestroom moge wezen. De roosterstroom wordt dus bepaald onder zo ongunstig mogelijke omstandigheden. Een schakeling van dit type is met goed gevolg gebruikt voor het beproeven van kwikthyratrons bij spanningen tot 30 kV topwaarde.

Resumerende, kunnen we de volgende voordelen van de beschreven fopschakeling opsommen:

1) De roosterstroom kan worden bepaald bij iedere belastingstoestand en bij anodespanningen tot bijv. 30 kV topwaarde.
2) Ook bij thyratrons voor grote stroom en hoge spanning wordt maar een klein vermogen uit het net opgenomen.

Wat dit laatste betreft, de installatie verbruikt met een thyratron voor 6 A (gemiddelde anodestroom) en met 100 V als secundaire spanning van T_1, slechts 800 W, alle hulpapparatuur inbegrepen. Vergelijkt men dit met wat nodig zou zijn voor een rechtstreekse meting bij 1000 V, dan wordt het duidelijk dat de voordelen van de fopschakeling zeer reëel zijn en dat, wanneer spanningen van 20 kV of meer vereist zijn, een directe methode niet meer in aanmerking zou komen. In zulke gevallen is men geheel op een fopschakeling aangewezen.

Samenvatting. Onderwerp van het artikel is het meten van de roosterstroom die in een thyratron loopt onmiddellijk vóór het ontsteken, bij de grootste toegelaten stroom en spanning. Deze roosterstroom geeft een belangrijke aanwijzing omtrent de kwaliteit van de buis. Verscheidene gebruikelijke schakelingen voor de bedoelde meting worden besproken, en aangetoond wordt dat zij alle min of meer onbevredigend zijn. Bij het meten aan thyratrons voor groot vermogen geldt in het bijzonder het nadeel dat het net zwaar wordt belast. Daarom is een „fopschakeling" („cheater circuit") ontworpen, die de vereiste werkomstandigheden nabootst en toch slechts een gering vermogen opneemt. De buis maakt hierin deel uit van een hoogspanningskring voor zwakke stroom, totdat ze bij het ontsteken automatisch wordt overgeschakeld naar een laagspanningskring, waarin de volle stroom mag lopen. Met deze schakeling kan onder alle werkomstandigheden de gezochte roosterstroom worden bepaald.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

GEZICHTSSCHERPTE IN VERBAND MET TELEVISIE

door G. J. FORTUIN. 621.843.6

In 1951 werd door de Medische Afdeling van Philips bij 228 personen van 7 tot 64 jaar een onderzoek verricht over de gezichtsscherpte in verband met contrast en helderheid. De resultaten van dit onderzoek worden hier in verband gebracht met beschouwingen over het kijken naar een televisiebeeld.

De informatie die men uit een tweedimensionaal vlak beeld verkrijgt, bijv. bij het bekijken van een foto of bij televisie, hangt enerzijds af van de meerdere of mindere scherpte en contrastrijkheid van het beeld zelf, anderzijds van de eigenschappen van het oog van de waarnemer onder de omstandigheden van waarneming (luminantie, afstand tot het beeld).

De eigenschap van het oog waar het hier op aankomt, de zg. gezichtsscherpte, kan quantitatief worden uitgedrukt door de hoek D_0 waaronder het kleinst waarneembare detail wordt gezien. Veelal neemt men aan dat deze hoek ongeveer 1′ bedraagt. Het is echter geheel misleidend aan D_0 één bepaalde waarde toe te kennen. Zoals wij zullen zien, hangt D_0, behalve van de luminantie, nog in hoge mate af van het contrast. Ook zijn er individuele verschillen, die eventueel nog vergroot kunnen zijn door onvolledige correctie van brekingsafwijkingen (geen of onjuiste bril), terwijl bovendien de leeftijd van de waarnemer van grote invloed is op de waarde van D_0.

Bij de televisie is het kleinste detail in verticale richting bepaald door de lijnbreedte; bij een beeld van 30 × 40 cm en 625 lijnen is deze ca. 0,5 mm. Het kleinste detail in horizontale richting is bepaald door de hoogste modulatiefrequentie. Men mag aannemen dat dit van dezelfde orde van grootte is. Is d de grootte van het kleinste detail, dan is de grootste afstand waarop men dit detail nog kan onderscheiden: $a = d/D_0$. Met $d \approx 0{,}5$ mm en $D_0 = 1'$ volgt hieruit $a = 1{,}8$ m. Deze waarde kan uiteraard slechts dienen om de gedachten te bepalen, daar in werkelijkheid a zal afhangen van alle bovengenoemde factoren die een invloed hebben op de waarde van D_0.

Het ligt voor de hand dat in het algemeen de beschouwer zo dicht bij het scherm wil zitten dat hij de kleinste details met de kleinste contrasten nog juist kan onderscheiden. Aangezien het contrast tussen de beeldlijnen en de ruimten daartussen groter is dan het kleinste contrast waarin de waarnemer geïnteresseerd is, brengt dit met zich mee dat de lijnen van het beeld dan ook duidelijk worden gezien. In de practijk is gebleken dat de kijker naar een televisiebeeld hiermee genoegen neemt.

Het is nu van belang nader in te gaan op de factoren die de grootte van D_0 beïnvloeden.

In 1951 is in de Medische Afdeling van Philips een uitvoerig onderzoek verricht over het verband tussen gezichtsscherpte, contrast en helderheid in verband met de leeftijd van de waarnemer [1]). De resultaten van dat onderzoek kunnen op het hier beschouwde probleem worden toegepast. De 228 proefpersonen (leeftijd 7 tot 64 jaar) waren schoolkinderen, sollicitanten en, wat de hogere leeftijdsgroepen betreft, geëmployeerden uit het Philipsbedrijf. De proefpersonen werden in de toestand gelaten waarin zij in het dagelijks leven plachten te verkeren, dus zonder een poging het gezichtsvermogen door een bril te verbeteren. Dit werd gedaan met het oog op de uit het onderzoek te trekken practische conclusies. Het oorspronkelijke doel was, na te gaan in hoeverre, bij het verrichten van zeer fijn werk (radiobuizenmontage) de invloed van het ouder worden der ervaren werkers kan worden gecompenseerd door een verhoging van het verlichtingsniveau.

Het onderzoek leverde, gedeeltelijk reeds bekende, resultaten over de samenhang tussen gezichtsscherpte, contrast en helderheid [2]), die hier in één empirische formule konden worden samengevat, terwijl als nieuw resultaat kwantitatieve gegevens over de invloed van de leeftijd van de waarnemer op de gezichtsscherpte werden verkregen.

Het onderzoek

Daar de herkenbaarheid van een voorwerp mede bepaald wordt door de vorm (men denke aan diverse typen drukletters), is het gewenst bij een onderzoek over de gezichtsscherpte een gestandaar-

[1]) G. J. Fortuin, Visual power and visibility, Diss. Groningen 1951; zie ook Philips Res. Rep. **6**, 251-287, 347-371, 1951.

[2]) Zie bijv. P. J. Bouma, Gezichtsscherpte en waarnemingssnelheid in verband met de wegverlichting, Philips techn. T. **1**, 215-220, 1936.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

diseerd voorwerp te kiezen. In het onderhavige geval was dit een zg. ring van Landolt (*fig. 1*).

Deze ringen bevinden zich op een wit bord (*fig. 2*), waarop in 16 rijen en 11 kolommen vakjes zijn aangebracht. In elk vakje is een ring van Landolt van zwart of grijs papier geplakt. Er zijn

Fig. 1. Ring van Landolt. De wijdte van de opening en de breedte van de ring zijn gelijk aan $^1/_5$ van de buitendiameter.

Als maat voor het contrast wordt daarbij genomen het verschil in luminantie $L_a - L_r$ tussen achtergrond en ring, gedeeld door de luminantie L_a van de achtergrond, of, wat bij eenzelfde verlichting van ring en achtergrond op hetzelfde neerkomt, het verschil in reflectievermogen $\varrho_a - \varrho_r$ tussen achtergrond en ring, gedeeld door het reflectievermogen ϱ_a van de achtergrond:

$$C = \frac{L_a - L_r}{L_a} = \frac{\varrho_a - \varrho_r}{\varrho_a}.$$

Bij gebruikmaking van de ringen van Landolt neemt men als maat voor de gezichtsscherpte de reciproke waarde van de hoek (gemeten in boogminuten) waaronder de opening wordt gezien in de kleinste ring waarvan de proefpersoon nog de orientatie kan vaststellen. Is deze hoek D_0, dan

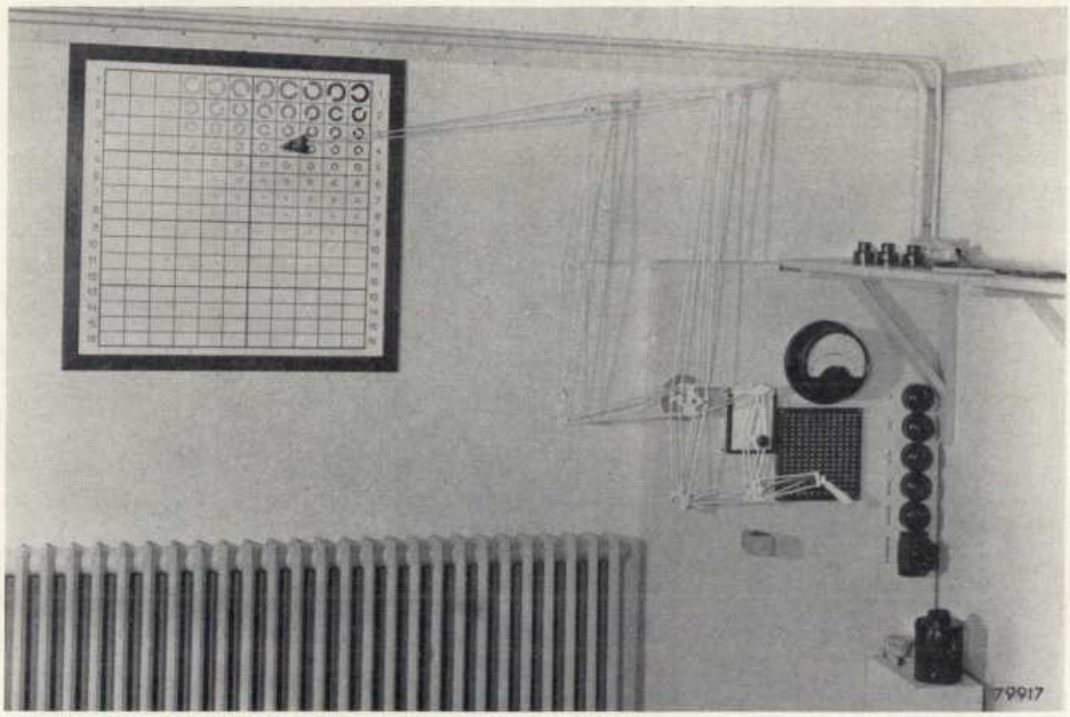


Fig. 2. Apparatuur voor het onderzoek van het gezichtsvermogen. Het bord aan de linkerzijde heeft 11 × 16 vakken. Elk vak bevat (met verschillende orientatie van de opening) een ring van Landolt van bekende afmeting en contrast. Door de pijl wordt telkens een ring aangewezen, waarvan de op 5 m afstand geplaatste proefpersoon de orientatie moet trachten te zien. Rechts de inrichting voor het half-automatisch registreren van de antwoorden.

acht mogelijke standen van de ring (opening boven, onder, links of rechts en de vier 45°-standen). In iedere kolom neemt de buitendiameter van de ringen volgens een meetkundige reeks van boven naar beneden af van 50 tot 2,2 mm. In de verschillende kolommen neemt het contrast volgens een rekenkundige reeks van rechts naar links af, van 0,94 tot 0.

noemt men dus $1/D_0$ de gezichtsscherpte. Op het bord met ringen wijst nu de leider van het onderzoek met een pijlpunt (zie fig. 2) telkens een bepaalde ring aan. In *fig. 3* is te zien hoe de proefpersoon hierop reageert door een draaibare ring in de stand te plaatsen die overeenkomt met de aangewezen ring op het bord. Een juist antwoord

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

wordt kenbaar gemaakt door een electrisch signaal (een wit schijfje verschijnt voor een opening), dat natuurlijk alleen voor de leider van het onderzoek zichtbaar is.

Fig. 2 laat tevens zien hoe dit signaal tot stand komt. De beweging van de pijlpunt wordt door middel van een parallelogram-mechanisme verkleind overgebracht op een stift, die beweegt over een isolerende plaat met gaatjes, en op een naald die beweegt over een in een houder geschoven vel papier. De plaat (en ook het vel papier) is als een verkleinde afbeelding van het bord met de vakjes te beschouwen. Ieder gaatje bevat een metalen busje, dat verbonden is met één van acht contacten die zich ter plaatse van de proefpersoon onder de draaibare ring bevinden. Wordt de stift in het gaatje gedrukt, dan wordt een stroom gesloten, echter alleen dan, wanneer de stand van de draaibare ring overeenkomt met de stand van de ring die door de pijlpunt wordt aangewezen.

Is het antwoord juist geweest, dan drukt de examinator de eerder vermelde naald naar binnen, waardoor in het genoemde vel papier een gaatje wordt geponst en het proefresultaat geregistreerd is (*fig. 4*).

Fig. 3. De proefpersoon antwoordt op de gestelde vraag door de draaibare ring in dezelfde stand te plaatsen als de aangewezen ring.

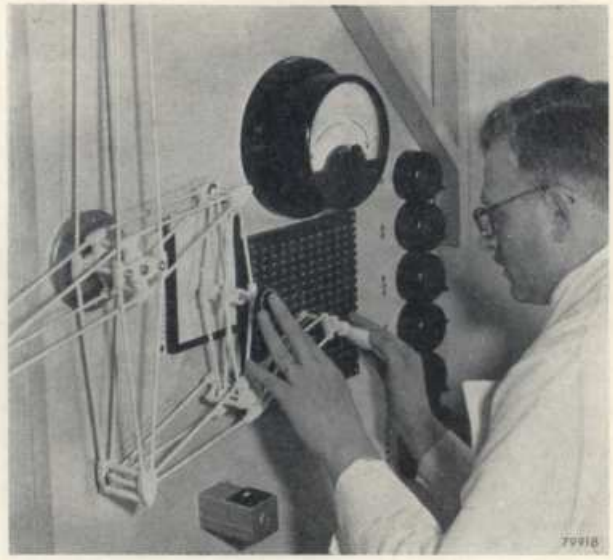


Fig. 4. De onderzoeker bij het schakelbord. Boven: de voltmeter voor contrôle van de spanning der verlichtingslampen. Met zijn linkerhand drukt de onderzoeker de naald in. Daaronder: het electrische signaalapparaat dat aanwijst of het antwoord juist is.

Als eindresultaat vindt men, voor een aantal (bij ons onderzoek vier) luminanties L_0 van het gezichtsveld, voor iedere proefpersoon 10 cijfers [3]), namelijk de nummers van de laatste ring in de diverse kolommen waarbij nog een juist antwoord werd gegeven. Als waarde van D_0 werd genomen het meetkundig gemiddelde tussen de bij deze laatste ring en bij de eerstvolgende kleinere ring behorende hoeken. Bij iedere waarde D_0 behoort een zeker contrast C_0. De drie grootheden L_0, D_0 en C_0 bepalen tezamen een zg. drempelsituatie. Bij het onderzoek werd het geheel van de drempelsituaties van één proefpersoon bestudeerd en nagegaan hoe dit van persoon tot persoon varieert.

Resultaten van het onderzoek

Het gemiddelde resultaat van alle proefpersonen kan men weergeven in een driedimensionaal diagram, waarbij D_0 is uitgezet als functie van C_0 en L_0 (*fig. 5*). Men ziet hieruit dat de hoek D_0 afneemt (en dus de gezichtsscherpte toeneemt) voor een gegeven luminantie met toenemend contrast en voor een gegeven contrast met toenemende luminantie.

Het oppervlak van fig. 5 kan worden weergegeven door de empirische formule:

$$\log D_0 = 2{,}17 \frac{1{,}57 - \log C_0}{\log L_0 + 3{,}95} - 0{,}79;$$

[3]) Bij de meest linkse van de kolommen was het contrast nul (papier van de ringen gelijk aan dat van de ondergrond). Deze kolom speelde bij het onderzoek verder geen rol.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

$\log D_0$ stelt hierin de waarde van $\log D_0$ (bij gegeven C_0 en L_0) voor, gemiddeld over alle proefpersonen[4]). Voor iedere proefpersoon afzonderlijk blijft in wezen dezelfde formule gelden, namelijk:

$$\log D_0 = 2{,}17\,\frac{1{,}57 - \log C_0}{\log L_0 + 3{,}95} - \log G, \qquad (1)$$

waarbij de grootheid G nu echter van persoon tot persoon verschilt.

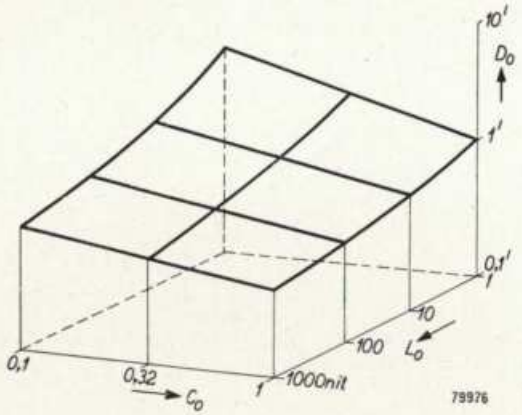


Fig. 5. Het gemiddelde resultaat voor alle proefpersonen, afgebeeld in een driedimensionaal diagram. Dit geeft het verband weer tussen het contrast C_0 van het proefobject, de luminantie L_0 en het kleinste waargenomen detail D_0.

G is een directe maat voor het „gezichtsvermogen" (visual power). Als van twee personen de ene een n maal zo grote G-waarde heeft als de andere, kan hij onder dezelfde omstandigheden n maal zo kleine details onderscheiden[5]). Physisch is $0{,}1G$ de reciproke waarde van de hoek waaronder de desbetreffende waarnemer de opening in een Landoltring nog juist kan zien bij bepaalde combinaties van C_0 en L_0, nl. zodanige waarvoor de term in formule (1) welke C_0 en L_0 bevat, gelijk is aan 1 (bijv. $C_0 = 1$ en $L_0 = 0{,}3$ nit $= 0{,}9$ lux op wit). De betekenis van formule (1) kan men ook zo uitdrukken dat het product $G{\cdot}D_0$ een universele functie van contrast en luminantie blijkt te zijn.

Om na te gaan in hoeverre formule (1) voor een bepaalde proefpersoon juist is, kan men uit deze formule voor ieder van de 40 onderzochte drempelsituaties (4 luminanties × 10 contrasten) log G uitrekenen. Indien de formule streng gold, zou men in alle 40 gevallen dezelfde waarde moeten vinden, of, ten gevolge van toevallige meetfouten, waarden die onregelmatig verdeeld zijn rondom een gemiddelde. Dit vindt men inderdaad in een groot aantal gevallen (het normale type). Er komen echter ook gevallen voor waarbij de gevonden waarden een tendentie vertonen om met toenemende C_0 of wel met toenemende L_0 toe of af te nemen. Proefpersonen waarbij dit gevonden wordt, passen iets minder goed in het algemene beeld dat door formule (1) wordt voorgesteld; de afwijkingen zijn echter niet zo groot dat de formule daardoor waardeloos zou worden. Voor de in de formule (1) in te vullen waarde van log G neemt men in ieder speciaal geval het gemiddelde van de boven bedoelde 40 afzonderlijk berekende waarden. Naar het gedrag van G kan men ten slotte de onderzochte proefpersonen indelen in een aantal typen, zoals in *tabel I* is aangegeven. Type A is het normale type, dat bij 67 % van de onderzochte personen werd gevonden.

Tabel I. Overzicht der visuele typen.

Type	reactie van G op toeneming luminantie	reactie van G op toeneming contrast	gevonden aantal in %
A	—	—	67
B_1	toeneming	—	11
B_2	afneming	—	5
C_1	—	toeneming	—
C_2	—	afneming	1
B_1C_1	toeneming	toeneming	4
B_2C_1	afneming	toeneming	1

De invloed van de leeftijd

Het „gezichtsvermogen" G blijkt nu op eenvoudige wijze af te hangen van de leeftijd van de proefpersoon. Wij hebben de proefpersonen ingedeeld in leeftijdsgroepen en voor iedere groep de gemiddelde waarde van log G bepaald. De aldus verkregen waarde van $\bar{G}$ is in *fig. 6* uitgezet tegen de gemiddelde leeftijd $\bar{A}$ van de groep. Uit deze figuur kan worden afgeleid dat

$$\bar{G} = 9 - 0{,}1\,\bar{A}, \qquad (2)$$

waarin A in jaren is uitgedrukt.

Uiteraard mag men deze empirische formule slechts toepassen binnen de leeftijdsgrenzen waar-

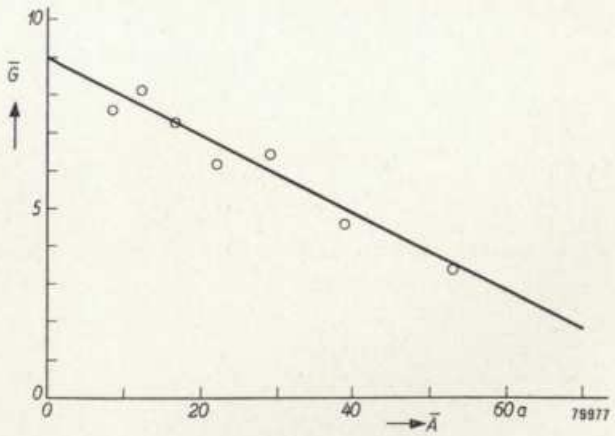


Fig. 6. De gemiddelde waarde van het gezichtsvermogen $\bar{G}$ voor diverse leeftijdsgroepen, uitgezet tegen de gemiddelde leeftijd $\bar{A}$ (in jaren) van de groepen.

[4]) Hierbij is D_0 uitgedrukt in minuten en L_0 in nit (cd/m²). In de literatuur vermeld in noot [1]) is de helderheid (B_0) uitgedrukt in millilambert (1 mL = 3,18 nit).
De schrijver heeft voorgesteld voor G de eenheid „snellen" in te voeren, ter ere van de Nederlandse ophthalmoloog Herman Snellen (1839-1918).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

voor zij werd afgeleid, nl. 10-60 jaar. Men kan er uit aflezen dat de gezichtsscherpte met een factor 2 daalt als men gaat van de leeftijd van 10 jaar naar die van 50 jaar, en, met een kleine extrapolatie, dat er nogmaals een daling met een factor 2 plaats vindt tussen 50 en 70 jaar. Dat zelfs een grove extrapolatie niet tot absurde resultaten leidt, blijkt als men uit formule (2) de leeftijd berekent waarvoor $G = 0$: men vindt $A = 90$ jaar.

Natuurlijk vertoont G binnen elke leeftijdsgroep een vrij grote spreiding. Deze wordt tot uitdrukking gebracht door *fig. 7*. Dat het algemene beeld van de sterke daling van G met toenemende leeftijd, die door fig. 6 en verg. (2) wordt aangetoond, door de spreiding slechts in geringe mate wordt beïnvloed, is heel goed te zien in *fig. 8*. Hier is het percentage proefpersonen van een bepaalde leeftijdsgroep aangegeven waarvan de G-waarde een gegeven waarde overtreft. Men leest uit deze figuur af dat

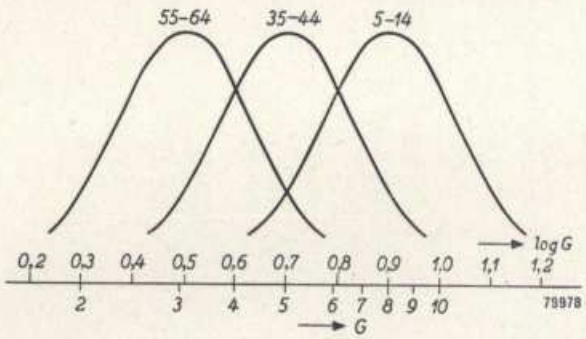


Fig. 7. Relatieve waarschijnlijkheid van G-waarden voor drie verschillende leeftijdsgroepen. De figuur werd als volgt verkregen. Voor iedere leeftijdsgroep werd bepaald bij hoeveel personen de waarde van $\log G = g$ gelegen was in de intervallen $-0{,}025$ tot $0{,}025$; $0{,}025$ tot $0{,}075$; enz. Uit deze gegevens werd afgeleid de gemiddelde waarde van $\log G$ (g_m) voor iedere leeftijdsgroep (zie fig. 6) en verder de standaarddeviatie, d.i. de wortel uit de gemiddelde waarde van de uitdrukking $(g - g_m)^2$. Deze standaarddeviaties bedroegen voor zes opeenvolgende leeftijdsgroepen resp. 0,095; 0,15; 0,11; 0,15; 0,28 en 0,14. Er is nu eenvoudigheidshalve aangenomen dat in iedere leeftijdsgroep de log G-waarden volgens Gauss zijn verdeeld en dat voor alle groepen de standaarddeviatie $s_m = 0{,}16$ bedraagt, d.i. het gemiddelde van de boven vermelde waarden. De getekende krommen worden dus voorgesteld door de formule

$$\exp\left[-(g - g_m)^2/2s_m^2\right].$$

Met behulp van deze formule zijn ook de lijnen in fig. 8 berekend.

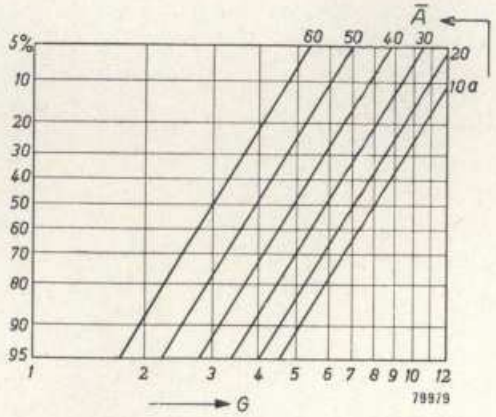


Fig. 8. Percentage van de proefpersonen waarvan de G-waarde ligt boven de als abscis uitgezette waarde, met de gemiddelde leeftijd A van de groep als parameter.

slechts de 10% besten van de leeftijdsgroep 55-64 jaar ($A = 60$) en de 10% slechtsten van de leeftijdsgroep 5-14 jaar ($A = 10$) ongeveer even goed zien als de middenmoot van de groep 35-44 jaar ($A = 40$).

De optredende variaties van D_0

Als wij nu de resultaten van het gehele onderzoek nog eens trachten te overzien, is het wel frappant hoe sterk de waarde van D_0, het kleinste waargenomen detail, naar omstandigheden kan variëren. *Tabel II* geeft hiervan een indruk. Zij bevat de D_0-waarden die uit formule (1) zijn berekend voor diverse contrasten en luminanties en voor verschillende gezichtsvermogens G, nl. voor de gemiddelde G van de leeftijdsgroepen 5-14 jaar, 25-34 jaar en 45-54 jaar, en voor de hoogste en de laagste G-waarde die bij het onderzoek werden gevonden ($G = 14$ resp. $G = 1$).

Tabel II. Het kleinste waargenomen detail D_0 (in minuten) voor drie contrastwaarden C_0 en vier luminantiewaarden L_0 bij een „gezichtsvermogen" $G = 1$, 4, 6, 8, en 14.

L_0 (nit) \ C_0 =	$G = 1$			$G = 4$			$G = 6$			$G = 8$			$G = 14$		
	0,1	0,32	1,0	0,1	0,32	1,0	0,1	0,32	1,0	0,1	0,32	1,0	0,1	0,32	1,0
1	26	13,5	7,2	6,5	3,4	1,8	4,1	2,1	1,15	3,3	1,7	0,9	1,8	0,95	0,5
10	13,5	8,1	4,9	3,4	2,0	1,25	2,1	1,3	0,8	1,7	1,0	0,6	0,95	0,6	0,35
100	9,5	5,8	3,7	2,2	1,4	0,95	1,4	0,9	0,6	1,1	0,7	0,45	0,6	0,4	0,25
1000	6,3	4,5	3,1	1,6	1,1	0,8	1,0	0,7	0,5	0,8	0,55	0,4	0,45	0,30	0,22

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Behalve deze selectie van numerieke waarden geven wij, om de invloed der diverse variabelen afzonderlijk aanschouwelijk te maken, in *fig. 9* en *10* nog enige grafische voorstellingen van formule (1). In fig. 9*a*, *b*, *c* zijn drie leeftijdsgroepen (dezelfde als in tabel II) ieder afzonderlijk genomen. Bij toepassing op een individu moet men rekening houden met het feit dat ten gevolge van de spreiding de effectieve leeftijd [6]) van een persoon verschillen kan van zijn ware leeftijd.

overeen met de situatie waarvoor men bij de televisie zich gesteld ziet. Bij de televisie kan men namelijk wel de helderheid van het beeld, door aan een knop te draaien, tot op zekere hoogte naar behoefte instellen, echter wordt een bovenste grens aan de helderheid gesteld door het feit dat, wegens de discontinuïteit van het beeld, flikkerverschijnselen kunnen optreden en dat, bij overigens gelijk blijvende omstandigheden, de critische flikkerfrequentie (frequentie waarboven geen flikkering wordt waarge-

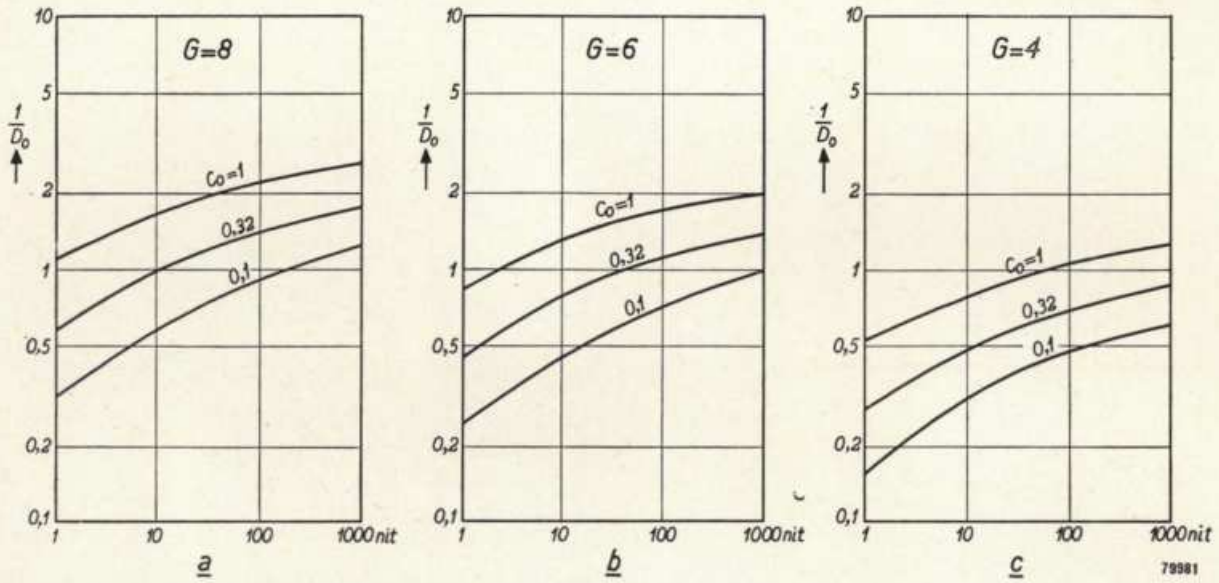


Fig. 9. De gezichtsscherpte ($1/D_0$) dubbellogarithmisch uitgezet tegen de luminantie L_0 van de achtergrond, voor drie waarden van het contrast ($C_0 = 0{,}1$, $C_0 = 0{,}32$ en $C_0 = 1{,}0$). *a*) Leeftijdsgroep 5-15 jaar, *b*) idem 25-35 jaar, *c*) idem 45-55 jaar.

In fig. 10 is L_0 tegen de effectieve leeftijd uitgezet voor drie waarden van het contrast en voor twee waarden van D_0, nl. 1′ en 10′ (0,00027 en 0,0027 rad). Men ziet hieruit dat, om hetzelfde detail te onderscheiden, men bij kleine details met toenemende leeftijd de luminantie sterker moet opvoeren dan bij grovere details. Dit strookt met het bekende feit dat oudere personen geneigd zijn aan kinderen het lezen bij zwak licht te verbieden met de waarschuwing „je bederft je ogen", omdat zij zelf kleine letters onder die omstandigheden niet meer kunnen onderscheiden.

Is omgekeerd de luminantie gegeven, dan kan men uit fig. 9 aflezen welke waarde D_0 heeft voor de verschillende leeftijdsgroepen. Dit laatste komt

nomen) hoger is naarmate de helderheid groter is. Bij de in Europa gebruikelijke fosforen en bij een netfrequentie van 50 Hz kan de maximaal toelaatbare schermluminantie op 100 nit (100 cd/m²) worden gesteld [7]).

Aangezien het boven beschreven onderzoek betrekking heeft op Landolt-ringen en men bij het bekijken van een televisiebeeld te doen heeft met details van andere soort (helderheidsvariaties langs de lijnen van het beeld) is het niet zonder meer geoorloofd formule (1) op het geval van televisie toe te passen. Aan de andere kant is het onderscheidingsvermogen voor details niet sterk afhankelijk van de aard van het detail. Wij mogen daarom formule (1) toch blijven gebruiken om althans een indruk te krijgen van de variaties in het onderscheidingsvermogen in afhankelijkheid van de diverse factoren die daarop invloed hebben.

Uit tabel II kan men zien dat als $C_0 = 0{,}1$ en

[6]) Onder effectieve leeftijd A_{eff} verstaan wij de leeftijd die een persoon zou moeten bezitten om de G-waarde te hebben die uit formule (2) zou volgen indien men daarin G vervving door G, en A door A_{eff}, dus

$$A_{\text{eff}} = 10(9 - G).$$

Voor G-waarden >9 wordt A_{eff} negatief.

[7]) Zie J. Haantjes en F. W. de Vrijer, Philips techn. T. **13**, 7-12, 1951.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

$L_0 = 100$ nit, D_0 kan variëren van 2,2′ ($G = 4$, $A_{\text{eff}} = 50$ jaar) tot 1,1′ ($G = 8$, $A_{\text{eff}} = 10$ jaar) en in extreme gevallen zelfs van 9,5′ tot 0,6′. Neemt men aan dat formule (1) kwantitatief op ons geval mag worden toegepast, dan betekent dit dat de afstand a van het scherm waarop men practisch alle details kan zien, varieert van 1,5 m ($A_{\text{eff}} = 10$ jaar) tot 0,8 m ($A_{\text{eff}} = 50$ jaar) en dat voor extreme waarnemers a zelfs kan uitlopen van 3,4 tot 0,18 m!

Deze beschouwingen kan men, mutatis mutandis, ook toepassen op het waarnemen van een geprojecteerd beeld (lantaarnplaatje, filmprojectie). Ook hier wenst men, met het oog op de zichtbaarheid van de details, de luminantie zo hoog mogelijk op te voeren, waarbij men eveneens aan een bovenste grens is gebonden, ditmaal in verband met de dimensionnering van projectie-apparaat en lichtbron en met de afstand van het projectie-apparaat tot het scherm (in het geval van cinemaprojectie worden bijzondere maatregelen genomen om aan het nadeel van flikkeren van het beeld te ontkomen [8])). Het is bekend dat men in het algemeen met een schermverlichting van 100 lux (schermluminantie 20-100 nit, afhankelijk van de reflectie-eigenschappen van het scherm) genoegen neemt. Neemt men aan dat de kleinste details op een scherm van 4 × 3 m een afmeting hebben van 2,5 mm (bepaald door de korrel van het negatief waarmee de opname werd gemaakt en door de scherpte van de opneemoptiek), dan komt men tot een gunstigste afstand van de waarnemer, die afhankelijk van de leeftijd varieert van 4 tot 8 m en, als men rekening houdt met extreme gevallen, van 1 tot 18 m.

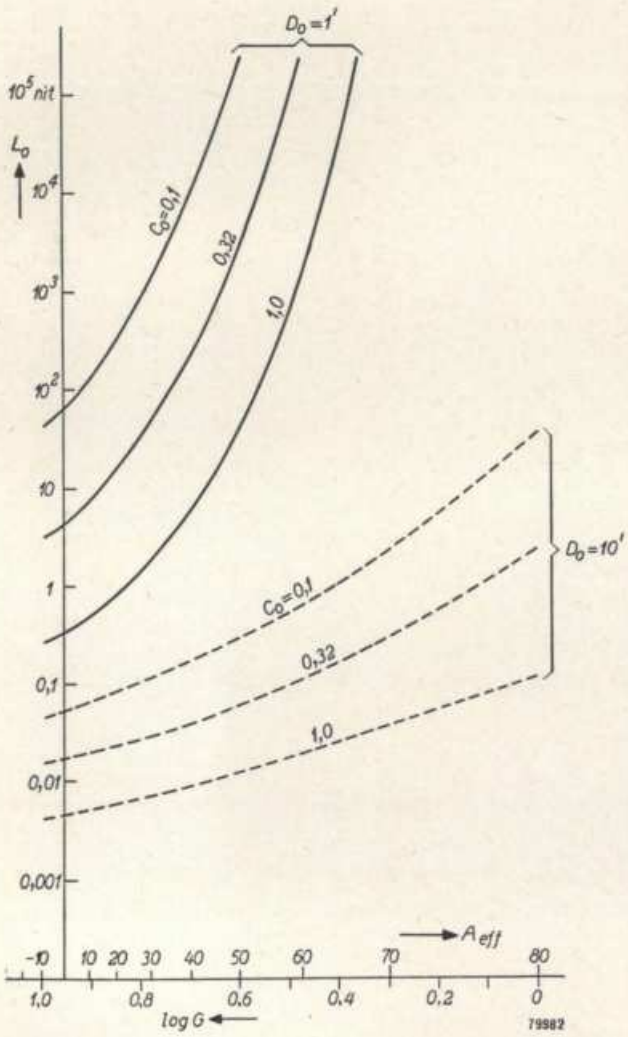


Fig. 10. Luminantie L_0, vereist voor het zien van een detail met afmeting $D_0 = 1'$ resp. 10′ en contrast $C_0 = 0{,}1$, 0,32 en 1,0, als functie van de effectieve leeftijd A_{eff}.

Wij eindigen met ervoor te waarschuwen dat men formule (1) niet zonder meer mag gebruiken voor het berekenen van verlichtingsnormen. In de eerste plaats hebben de proeven betrekking op drempelsituaties en geven zij dus een minimum aan waar men in de practijk van de verlichting zeker boven moet blijven. Hoeveel, is moeilijk te zeggen, aangezien hier naast het onderscheidingsvermogen ook het welbehagen (comfort) van het subject een rol speelt. Verder stelt de formule het resultaat voor van laboratoriumproeven waarbij de factor tijd niet in acht werd genomen. Het is duidelijk dat men bij het trekken van conclusies uit zulke proeven voor gevallen waarbij het gaat om prestatie en waarbij dus de waarnemingssnelheid in het geding komt, voorzichtig moet zijn.

[8]) Zie bijv. Philips techn. T. **16**, 20, 1954 (No. 1).

Samenvatting. Bij het kijken naar een televisiebeeld (of een projectiebeeld) is de gezichtsscherpte van de waarnemer van belang. Een maat hiervoor is het kleinste detail D_0 dat bij gegeven contrast en bij gegeven luminantie van het object kan worden waargenomen. Uit een onderzoek met Landolt-ringen, verricht aan 228 proefpersonen tussen 7 en 64 jaar, is gebleken dat het product $G \cdot D_0$ een universele functie van contrast en luminantie is, waarbij G voor elke waarnemer een constante is (het „gezichtsvermogen") die, afgezien van een zekere spreiding, afhangt van de leeftijd A van de waarnemer volgens

$$G = 9 - 0{,}1\,A.$$

Meegedeeld wordt hoe dit gemiddelde resultaat is verkregen en met welke restricties het op een individuele waarnemer mag worden toegepast. De betekenis van het gevonden verband wordt door een tabel en door grafieken verduidelijkt. De gezichtsscherpte blijkt ten ruwste met een factor 2 toe te nemen als a) de luminantie toeneemt met een factor 100, b) het contrast toeneemt met een factor 5. Onder overigens gelijke omstandigheden is het gezichtsvermogen van 50-jarigen de helft en dat van 70-jarigen $^1/_4$ van dat van 10-jarigen.

Hoewel het bij details van andere soort niet zonder meer geoorloofd is uit het gevonden verband kwantitatieve conclusies te trekken, kan men hieruit wel een indruk krijgen in welke mate de lichtbehoefte met de leeftijd toeneemt, resp. in welke mate bij gegeven luminantie en contrast het onderscheidingsvermogen van details voor oudere personen kleiner is dan voor jongere.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

WATERSTOFLIQUEFACTIE

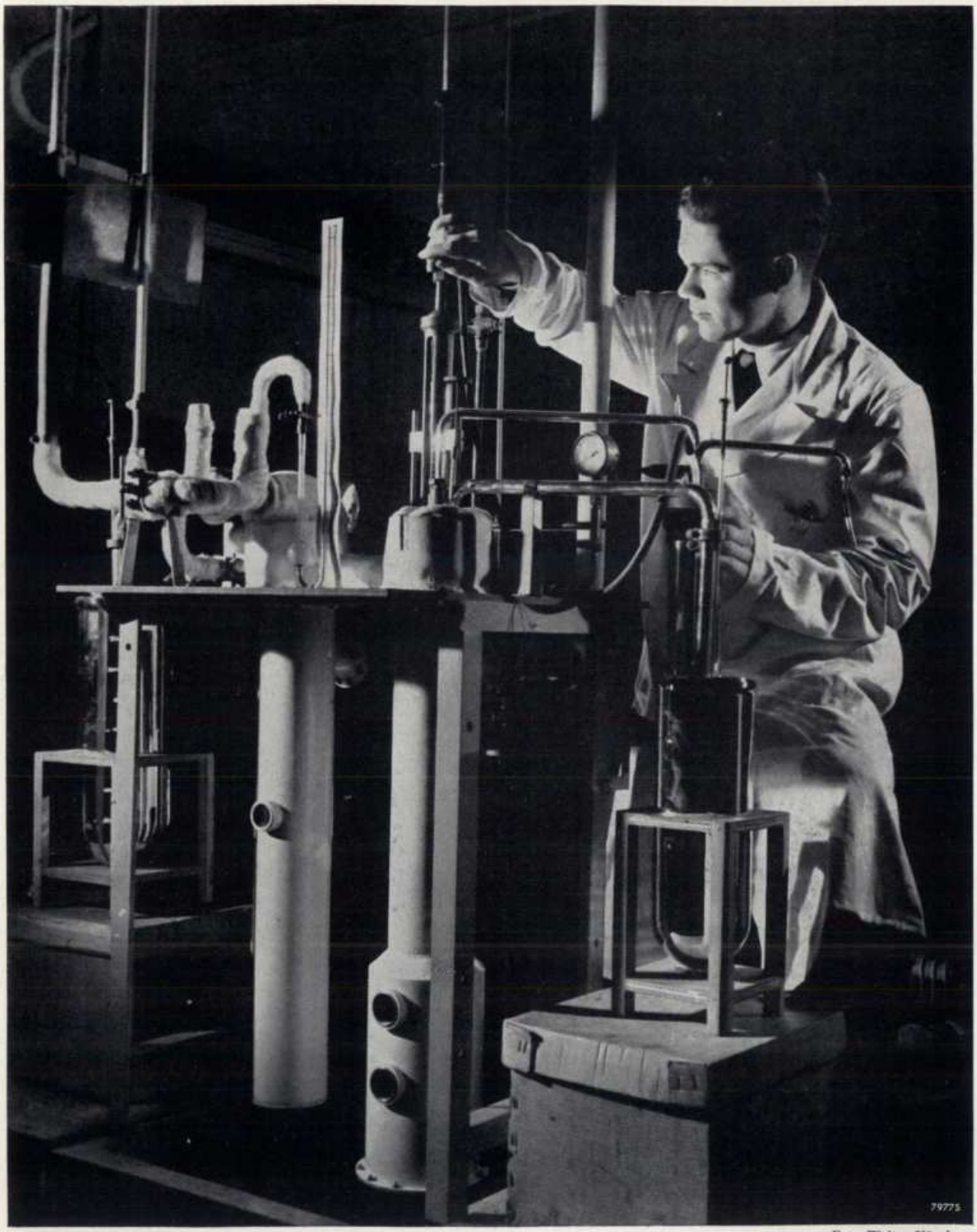


Foto Walter Nürnberg

In het onderzoek van de eigenschappen der vaste stof is de laatste twee decennia opmerkelijke vooruitgang gemaakt. De electrotechnische industrie heeft daarvan ruimschoots de vruchten geplukt (ferromagnetische materialen, halfgeleiders, diëlectrica, luminescerende stoffen, enz.).

Het is bij dit onderzoek soms van belang, tot zeer lage temperaturen te gaan, bijv. wanneer het wenselijk is de thermische beweging der atomen en moleculen, die een bepaald verschijnsel kan compliceren, drastisch te beperken. In het Philipslaboratorium te Eindhoven beschikt men daartoe o.a. over een eenvoudige waterstofliquefactor, een installatie waarin waterstofgas na voorkoeling met behulp van vloeibare stikstof wordt vloeibaar gemaakt. Vloeibare waterstof heeft een kookpunt van 20,4 °K bij normale druk. In de witte bussen op de foto bevinden zich de onderdelen voor de reiniging en de voorkoeling van het gas en de eigenlijke liquefactor. Men is juist bezig een portie vloeibare waterstof over te hevelen in een Dewar-vat.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

DE SLIJTAGE VAN DIAMANTEN TREKSTENEN

door L. SCHULTINK, H. L. SPIER en A. van de WAGT.

679.89:549.211:620.178.1

De diamant ontleent zijn kostbaarheid niet slechts aan zijn zeldzaamheid en zijn fraaie lichtbrekende eigenschappen, waardoor hij onder de edelstenen nog steeds de ereplaats inneemt, doch ook aan zijn uitermate grote mechanische hardheid en slijtvastheid. Deze laatste eigenschappen zijn het die de diamant een onvervangbare plaats hebben bezorgd onder de materialen voor technische gereedschappen. Behalve als slijpmiddel, snijgereedschap en lagermateriaal, bewijst de diamant goede diensten als treksteen ter vervaardiging van draden van op zichzelf reeds zeer harde metalen, zoals wolfraam en molybdenium. Ook diamanten slijten echter bij voortdurend gebruik. Speciale onderzoekingen geven aanleiding tot het vermoeden dat de slijtage van diamanten trekstenen tot een minimum kan worden beperkt door de kristallografische orientatie van het trekkanaal gunstig te kiezen.

Inleiding

Diamant is technisch een uitermate nuttig materiaal, doordat zijn mechanische hardheid het grootst is van alle bekende materialen. Deze eigenschap heeft diamant gemaakt tot een gereedschapsmateriaal van onovertrefbare waarde: 80% van de productie der diamantmijnen wordt gebruikt voor industriële toepassingen, slechts 20% vindt zijn weg naar de etalages van de juwelier. In dit artikel zullen wij ons speciaal bezighouden met de toepassing van de diamant als treksteen, ter vervaardiging van dunne draden van zeer harde metalen zoals wolfraam, die met behulp van trekstenen van ander materiaal niet of slechts ten koste van enorme slijtage van het gereedschap tot de gewenste geringe diameter kunnen worden getrokken. Opdat een diamant als treksteen kan worden gebruikt, dient men er eerst een kanaal van de gewenste diameter doorheen te boren. Dit gelukt, zij het langs bijzondere weg; men kan ronde boorkanalen van alle gewenste diameters verkrijgen.

Zal de diamant als treksteen voldoen, dan moet tijdens het trekken de diameter van het boorgat niet veranderen, en ook de ronde vorm moet behouden blijven. Dit ideaal is in de practijk niet te verwezenlijken, zelfs diamant slijt tijdens het gebruik. Na de passage van vele duizenden of vele tienduizenden meters wolfraamdraad blijkt gewoonlijk het trekkanaal aanmerkelijk van zijn oorspronkelijke vorm af te wijken.

De mate waarin deze slijtage optreedt, en ook de uiteindelijke vorm van het boorkanaal, hangt van vele factoren af. Wij noemen hier slechts de toestand van de buitenste lagen van de te trekken draad, het gebruikte smeermiddel, en de temperatuur. Ook indien deze factoren constant gehouden worden, kunnen echter nog verrassende verschillen in aard en snelheid van de slijtage optreden. Dit komt doordat in de diamant steeds onzuiverheden en insluitsels aanwezig zijn, die op de slijtage invloed kunnen uitoefenen. Bovendien worden al naar gelang van de kristallografische orientering van het boorkanaal verschillende kristallografische vlakken afgesleten, en het is bekend dat de slijtvastheid van diamant sterk afhankelijk is van de kristallografische orientering van de aan slijtage blootgestelde vlakken.

Dit laatste effect vormt het onderwerp van dit artikel [1]). Alvorens echter de slijtage tijdens het trekken zelf te behandelen, zullen wij kort in het algemeen de slijtvastheid van diamant bespreken.

Slijtage van diamant in afhankelijkheid van de kristallografische orientatie

In de practijk van het diamantbewerken is welbekend, dat een diamant zich in bepaalde richtingen en op bepaalde vlakken veel gemakkelijker laat slijpen en polijsten dan in andere richtingen. De slijtvastheid van diamant is sterk anisotroop, de richtingen van geringste slijtvastheid hangen ten nauwste samen met de kristalstructuur van deze edelsteen.

Kristalstructuur

Diamant kristalliseert in het kubische systeem. De rangschikking van de koolstofatomen in een elementaire cel is zeer karakteristiek: men spreekt vaak van de diamantstructuur. Deze structuur bezitten een aantal stoffen waarin de bindingskrachten tussen de atomen van het valentietype

[1]) Uitvoeriger wordt het hier behandelde weergegeven in een binnenkort te publiceren artikel van de auteurs in Appl. sci. Res.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zijn. Een belangrijke eigenschap van dit type bindingskrachten is, dat zij ruimtelijk bepaalde sterk uitgesproken voorkeursrichtingen hebben. De koolstofatomen in het diamantrooster hebben elk vier naaste buren, die volgens een regelmatige tetraëder rondom het centrale atoom zijn gerangschikt, zodat de vier bindingsrichtingen onderling symmetrisch in de ruimte zijn georienteerd. Men ziet dit in *fig. 1*.

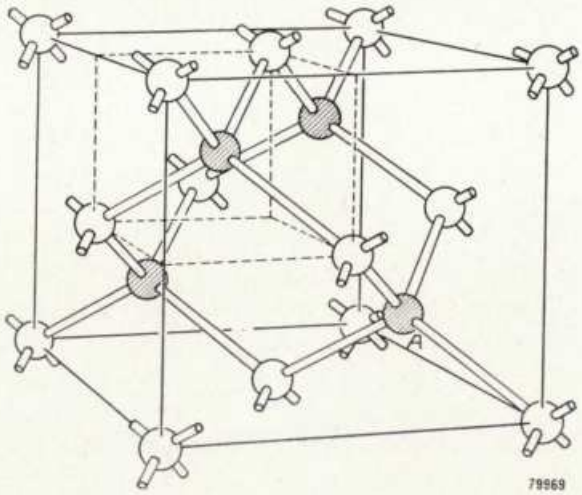


Fig. 1. Kubische elementaire cel van diamant.

De koolstofatomen bevinden zich op de hoekpunten en in de middens der zijvlakken van de kubus, zoals bij de normale kubisch vlakkengecentreerde kristalstructuur, maar bovendien bevat de cel nog vier atomen. Deelt men de kubus in acht onderling gelijke kubussen, elk met als ribbe de halve celribbe, dan bevinden zich deze, gearceerd in fig. 1 aangegeven vier atomen in de middelpunten van vier der kleine kubussen, die twee aan twee slechts een ribbe gemeen hebben. Op deze wijze ziet men dat de bovengenoemde tetraëderomringing van elk koolstofatoom door vier buren overal verwezenlijkt is.

De hardheid van diamant is grotendeels daaraan toe te schrijven dat het zeer veel energie kost een of meer koolstofatomen uit hun tetraëder los te maken, want daarbij moeten een aantal bindingen worden verbroken en wordt de symmetrie der bindingen, zo belangrijk in een kristal met valentiebindingen, verstoord.

De vlakken die een natuurlijke diamant begrenzen, hebben gewoonlijk een eenvoudige kristallografische orientatie. Drie orientaties komen nagenoeg steeds voor:

a) Volgens de kubusvlakken, in de kristallografische notatie (100)-vlakken genaamd.

b) Volgens de rhombendodecaëdervlakken of (110)-vlakken. Dit zijn de vlakken door een kubusribbe en een die ribbe snijdende vlakkendiagonaal.

c) Volgens de octaëdervlakken of (111)-vlakken, dit zijn de vlakken loodrecht op een lichaamsdiagonaal.

Slijtage

Bij het afslijpen van de diverse diamantvlakken, volgens een willekeurige slijprichting, blijkt, dat de drie meest voorkomende vlakken gemiddeld ongelijke slijtvastheid hebben. De rhombendodecaëdervlakken worden in het algemeen het gemakkelijkst afgeslepen; dwz. door een kracht, werkend in een rhombendodecaëdervlak, vindt in het algemeen de materiaalverwijdering het gemakkelijkst plaats. Daarop volgen de kubusvlakken, terwijl de octaëdervlakken zeer slijtvast zijn, dwz. een kracht die in een octaëdervlak werkt, veroorzaakt slechts een geringe materiaalverwijdering.

In een gegeven vlak is het echter nog van grote invloed, welke de slijprichting is. Er blijken in elk vlak bepaalde voorkeursrichtingen te bestaan, waarin de slijtvastheid het geringst is. In het (110)-vlak is voorkeursrichting de kubusrichting in dat vlak gelegen, in het (100)-vlak zijn beide kubusrichtingen gelijkwaardige voorkeursrichtingen, terwijl in het octaëdervlak de orthogonale projecties van de drie kubusrichtingen in dat vlak als voorkeursrichtingen dienst doen. In *fig. 2* zijn schematisch de orientaties van geringe slijtvastheid, dit betekent dus gemakkelijke slijpbaarheid, voor een diamantkristal weergegeven.

Voor richtingen die van de voorkeursrichtingen

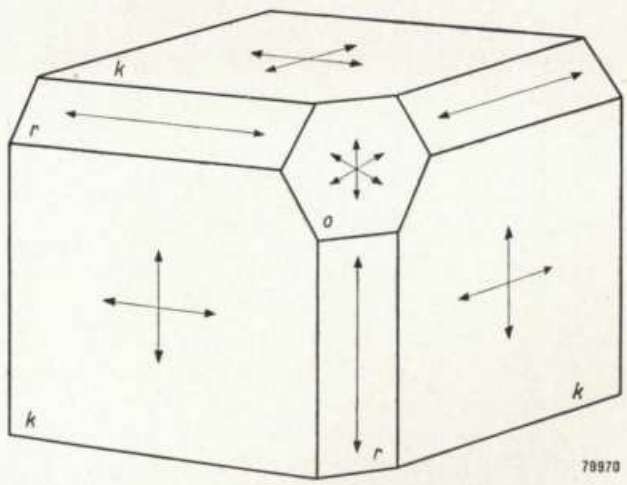


Fig. 2. Voorkeursorientaties voor het slijpen van diamant, schematisch voorgesteld. De voorkeursrichtingen op de diverse kristalvlakken zijn door pijlen aangegeven, de lengte van de pijlen is een maat voor de slijpbaarheid. Kubusvlakken zijn aangeduid met *k*, rhombendodecaëdervlakken met *r*, octaëdervlakken met *o*. (Ontleend aan het in [3]) aangehaalde artikel.)

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

afwijken, kan de slijpbaarheid in goede benadering worden voorgesteld door een uitdrukking van de vorm:

$$S = A \cos^2\Theta, \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

waarin A een constante is die slechts van de aard van het slijpvlak afhangt en die, zoals uit het bovenstaande duidelijk zal zijn, groot is voor (110)-vlakken en klein voor (111)-vlakken, en waarin Θ de hoek tussen slijprichting en voorkeursrichting aangeeft.

De samenhang tussen de atomen in een diamantkristal kan behalve door slijpen ook door splijten worden verbroken. Het octaëdervlak blijkt een gunstig splijtvlak te zijn. Dit betekent dat een kracht loodrecht op de octaëdervlakken relatief gemakkelijk tot het verbreken van bindingen leidt. Zoals reeds gezegd, geldt voor een kracht evenwijdig aan deze vlakken juist het tegendeel.

De verklaring van de zojuist behandelde anisotrope slijteigenschappen van diamant berust op de gerichte bindingskrachten tussen de atomen, en is o.a. door Stott [2]) gegeven. Wij willen hier slechts één geval beschouwen, en wel de slijtvastheid van het rhombendodecaëdervlak ((110)-vlak). In *fig. 3* is de configuratie van de atomen in een diamantkristal

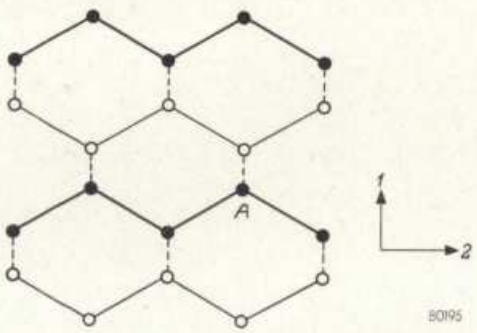


Fig. 3. Configuratie van atomen in een diamantkristal, gezien loodrecht op een rhombendodecaëdervlak. De stippen stellen atomen voor in het rhombendodecaëdervlak, dat in het vlak van tekening ligt, de open cirkeltjes atomen in het eerstvolgende vlak daaronder. Getrokken lijnen zijn bindingen die evenwijdig aan het vlak van tekening verlopen, gestippelde lijnen bindingen tussen de twee genoemde atoomvlakken. Pijl *1* is volgens de kubusrichting gericht, pijl *2* volgens een vlakkendiagonaal. Het atoom A (corresponderend met het eveneens met A gemerkte atoom in fig. 1) zal gemakkelijker worden verwijderd door een kracht evenwijdig aan pijl *1* dan door een kracht evenwijdig aan pijl *2*. (Ontleend aan het in [2]) aangehaalde artikel.)

geschetst zoals die wordt gezien uit een richting loodrecht op het genoemde vlak. De als stippen aangegeven atomen liggen in het vlak van tekening, dus in het rhombendodecaëdervlak dat geslepen zal worden, de open cirkeltjes stellen atomen voor in de eerste laag beneden dit vlak. De verbindingslijnen zijn de bindingen tussen de atomen; getrokken lijnen stellen bindingen voor die evenwijdig aan het vlak van tekening verlopen, gestippelde lijnen bindingen met de diepere laag. Ter verduidelijking is een atoom in deze figuur en het ermee corresponderende atoom in fig. 1 met A gemerkt. Men kan aanvoelen dat het atoom A het gemakkelijkst verwijderd zal kunnen worden door een kracht uitgeoefend in de richting van de pijl *1*, dat is in een kubusrichting, en het moeilijkst door een kracht volgens de pijl *2*, dat is volgens een vlakkendiagonaal. Daarom is de kubusrichting voorkeursrichting voor het afslijpen.

Dergelijke overwegingen leiden ook tot een aannemelijke verklaring van andere voorkeursorientaties voor slijten en splijten.

[2]) W. Stott, National Physical Laboratories, Collected Reports **24**, 3-55, 1938.

Het slijten van een boorkanaal tijdens het draadtrekken

Richten wij na deze inleiding onze aandacht weer op de slijtage van trekstenen. Met zeer grote waarschijnlijkheid mogen wij aannemen dat de begrenzing van een boorkanaal wordt gevormd door submicroscopische stukjes van kristallografische vlakken die behoren tot de drie hierboven genoemde categorieën.

Beschouwen we eerst een boorkanaal in de richting van een kubusribbe, dus loodrecht op een kubusvlak. Het boorkanaal zal dan waarschijnlijk zijn begrensd door kubusvlakken k en rhombendodecaëdervlakken r (*fig. 4*). Zoals uit het bovenstaande duidelijk geworden zal zijn, slijten de rhombendodecaëdervlakken als ze in een kubusrichting worden aangeslepen, zoals bij het draadtrekken het geval is, het snelst van alle mogelijke kristalvlakken. De rhombendodecaëdervlakken zullen dus ook nu het snelst worden afgeslepen, en de uiteindelijke doorsnede van het boorkanaal zal vierkant worden. De slijtage zal, daar het hier om de relatief gemakkelijk slijtende rhombendodecaëder- en kubusvlakken gaat, vrij snel verlopen.

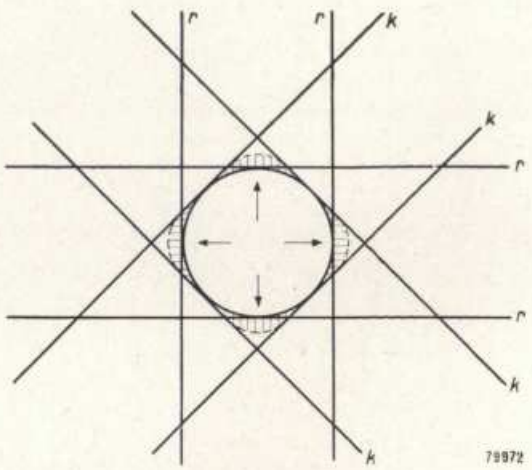


Fig. 4. Een trekkanaal loodrecht op een kubusvlak is omringd door kubusvlakken k en rhombendodecaëdervlakken r, zoals schematisch is aangegeven. Slijtage zal voornamelijk optreden op de vlakken r, waardoor het trekkanaal een vierkante vorm zal aannemen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Bij boring loodrecht op een rhombendodecaëdervlak wordt de omringing van het boorkanaal gevormd door alle drie de genoemde soorten kristallografische vlakken (*fig. 5*). Nu valt geen enkele van de hierboven vermelde gemakkelijke slijprichtingen precies samen met de trekrichting.

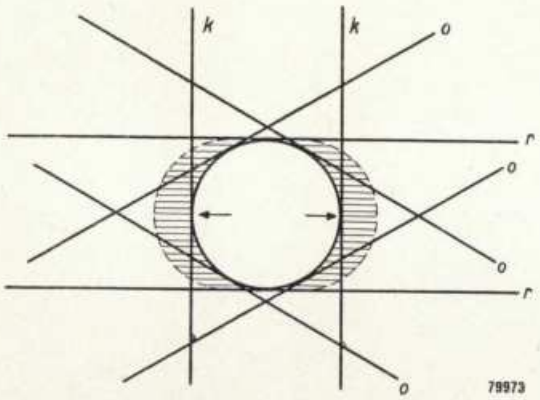


Fig. 5. Een boorkanaal loodrecht op een rhombendodecaëdervlak is omgeven door alle drie de soorten hoofdvlakken *k*, *r* en *o* (schematisch). Slijtage zal bij voorkeur op de kubusvlakken optreden, waardoor het kanaal een ovale doorsnede aanneemt.

Om na te gaan welke soort vlakken het snelst zullen afslijten, dienen we te onderzoeken voor welke vlakken de uitdrukking (1) het grootst is. In dit geval blijken de kubusvlakken het snelst af te slijten. Zoals in fig. 5 schematisch is aangegeven, zal het boorkanaal daardoor geleidelijk een ovale vorm, met de lange as in de kubusrichting, aannemen. Hier zal het slijten van het boorkanaal langzamer verlopen dan in het eerste geval, daar nu niet volgens een voorkeursrichting wordt geslepen.

Nemen we het boorkanaal loodrecht op een octaëdervlak, dan is het geheel omgeven door rhombendodecaëdervlakken, die zich in niets van elkaar onderscheiden wat de relatieve orientatie ten opzichte van de trekrichting aangaat (*fig. 6a*). We zouden daarom verwachten dat het boorkanaal zeshoekig werd, daar alle grensvlakken gelijkelijk afslijten. Waargenomen wordt echter dat een boorkanaal in deze orientatie vaak geleidelijk een driehoekige doorsnede aanneemt.

De verklaring hiervoor is niet met zekerheid te geven. Mogelijk is dat de rhombendodecaëdervlakken die het boorkanaal omringen, na verloop van tijd plaats maken voor octaëdervlakken (fig. 6*b*). Deze liggen wel niet geheel evenwijdig met de trekrichting, maar maken er toch een relatief kleine hoek mee. De slijtage van deze octaëdervlakken, waarvan de helft met de trekrichting een kleine scherpe hoek, de andere helft een stompe hoek insluit, krijgt nu blijkbaar de overhand. Slechts de „aan"-geslepen octaëdervlakken *o* zullen slijten, de „in"-geslepen vlakken *o'* niet, en men kan op deze wijze inzien dat het boorkanaal een driehoekige vorm zal gaan aannemen. Wegens het optreden van octaëdervlakken, en wegens de relatief ongunstige orientatie van de slijprichting, zal de slijtage zeer langzaam verlopen, langzamer dan in de beide vorige gevallen.

De conclusies betreffende de symmetrie van de uiteindelijke vorm van de doorsnede der boorkanalen kunnen ook geheel zonder gebruikmaking van de bovenstaande redeneringen worden bereikt; deze vorm zal immers steeds worden bepaald door

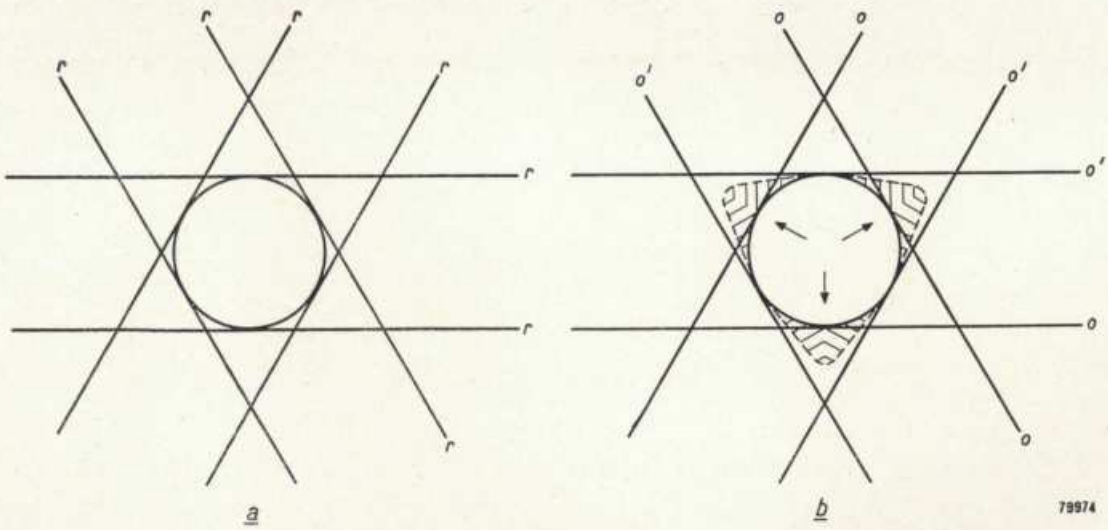


Fig. 6. *a*) Een boorkanaal loodrecht op een octaëdervlak is omgeven door rhombendodecaëdervlakken *r*, die alle gelijkelijk afslijten. *b*) Na verloop van tijd maken deze vlakken waarschijnlijk plaats voor octaëdervlakken *o* en *o'*, waarvan slechts de gunstig georienteerde *o* zullen slijten, dat zijn die welke met de trekrichting een kleine scherpe hoek maken. Ten slotte krijgt het kanaal dan een driehoekige doorsnede.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de anisotropie van het diamantkristal. Boring langs een drietallige as zal dan een kanaal opleveren dat uiteindelijk een doorsnede met drietallige symmetrie verkrijgt, enz. Anders is het gesteld met de slijtagesnelheid; slechts door na te gaan welke vlakken worden afgeslepen, kan men hierover opheldering verkrijgen.

Als theoretische conclusie mag dus gelden, dat het aanbeveling verdient de trekkanalen zo goed mogelijk loodrecht op de octaëdervlakken te boren, daar dan de slijtage het geringst zal zijn.

Het experimentele onderzoek van de slijtvastheid als functie van de kristallografische orientatie stuit op grote moeilijkheden, die o.a. veroorzaakt worden doordat de homogeniteit der diverse trekstenen veel te wensen overlaat. Slechts een groot opgezet statistisch onderzoek kan hier uitkomst brengen. Voor die toepassingen waarbij gebruik wordt gemaakt van zeer grote aantallen trekstenen, kan dit onderzoek tot een aanmerkelijke beperking van de slijtage leiden.

Een bijzonderheid van het onderzoek willen we hier nog noemen: de orientatie van een treksteen bepaalt men uit het röntgendiffractiebeeld. Met behulp van de kort geleden ontwikkelde röntgenbeeldversterker[3]) kan dit beeld zeer gemakkelijk direct visueel aan de desbetreffende treksteen worden waargenomen; het maken van fotografische opnamen van het diffractiebeeld is overbodig.

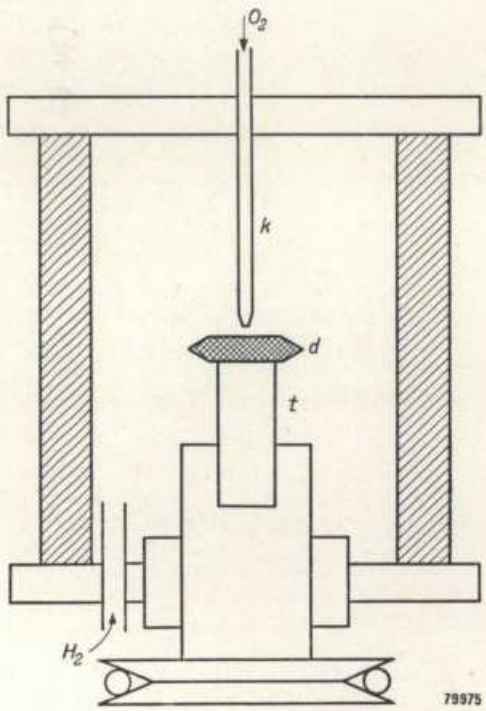
Ter toetsing van de bovenstaande conclusies is getracht, langs een andere weg de diamant aan te tasten, en wel door etsing of liever inbranding. Het zal blijken dat de resultaten die dan worden verkregen, goed met het bovenstaande overeenstemmen.

Etsen van diamantvlakken

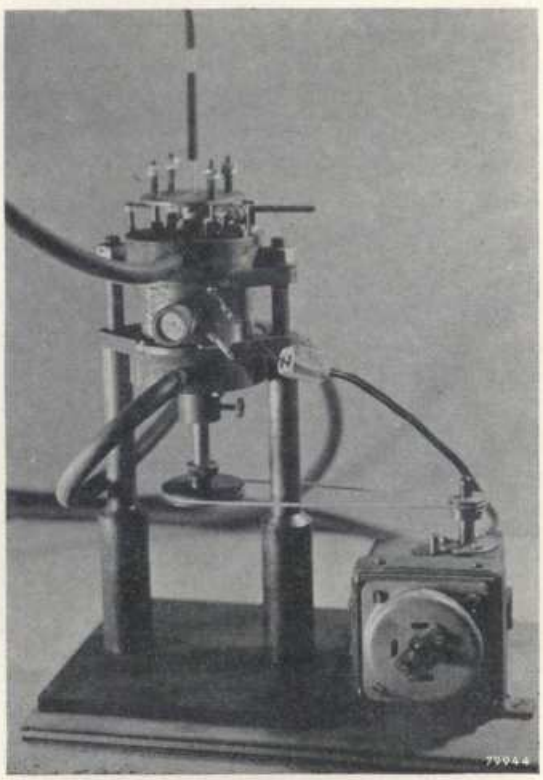
Zoals bekend, wordt diamant door de gebruikelijke chemische beits- en etsvloeistoffen practisch niet aangetast. Ter bestudering van de etsfiguren op de drie hoofdvlakken van diamant werd daarom de volgende methode toegepast:

De te onderzoeken diamant is in een electrisch oventje draaibaar opgesteld (*fig. 7*). Het te etsen vlak ligt horizontaal. Op zeer korte afstand boven dit vlak mondt een kwartsglasbuisje met nauwe opening uit, dat eveneens beweegbaar is opgesteld, zodat bij draaiing van de diamant het gehele oppervlak bestreken kan worden. De temperatuur in het oventje bedraagt 800 à 900 °C; in de oven wordt een

[3]) M. C. Teves en T. Tol, Electronische versterking van röntgenbeelden, Philips techn. T. **14**, 65-75, 1952.



a



b

Fig. 7. *a*) Toestel voor het etsen van een diamant in een gegeven orientatie door inbranden. De diamant *d* is draaibaar bevestigd op de tafel *t*. Een beweegbaar kwartsglasbuisje *k* mondt uit boven de diamant. Het geheel is opgesteld in een oven waarin een waterstofatmosfeer wordt onderhouden; de temperatuur in de oven bedraagt ca. 850 °C. Door de kwartsglazen buis wordt zuurstof op de diamant geblazen.
b) Foto van het toestel.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

waterstofatmosfeer onderhouden ter bescherming van de diamant tegen verbranding. Blaast men nu door het bewegende kwartsglasbuisje een fijne straal zuurstof op het oppervlak, dan verkrijgt men een duidelijke „etsing" (feitelijk inbranding).

Het blijkt nu dat, om eenzelfde mate van inbranding te verkrijgen, de etstijden voor een (111)-, een (110)- en een (100)-vlak zeer verschillend zijn, zoals in de hiervolgende tabel, die geldt voor een bepaalde inbranddiepte, is geïllustreerd:

Kristalvlak	Etstijd in minuten
(110)	5
(100)	8
(111)	$11^1/_2$

Men ziet dat het rhombendodecaëdervlak (110) zich het gemakkelijkst laat afbranden, het octaëdervlak (111) het moeilijkst. Het verwijderen van koolstofatomen blijkt dus, zowel bij slijpen als bij branden, het gemakkelijkst te gaan uit het rhombendodecaëdervlak, het moeilijkst uit het octaëdervlak.

Een volledige overeenstemming tussen de bovengenoemde vormveranderingen van boorkanalen in diamant tijdens het draadtrekken en de etsfiguren op de diverse kristalvlakken komt tot uiting als de etsing zo wordt uitgevoerd dat de diamant draait doch het kwartsglasbuisje stilstaat, zodat een gelocaliseerde inbranding wordt verkregen. De etsfiguren op de diverse kristalvlakken, die dan ontstaan, zijn in *fig. 8* afgebeeld. Duidelijk komt naar voren dat het op deze wijze gebrande gat in een kubusvlak vierkant is en in een rhombendodecaëdervlak ovaal, terwijl het gat in een octaëdervlak een driehoekige vorm heeft. Dit zijn dus geheel dezelfde symmetrieën als bij de trekkanalen in de diverse orientaties uiteindelijk optreden, en die uit hoofde van de kristalanisotropie ook moeten ontstaan.

Bezien we ten slotte de in hun geheel afgebrande oppervlakken onder de electronenmicroscoop, dan vinden we dat de afgebrande kubusvlakken bezet zijn met vierzijdige pyramides (*fig. 9a*). De afgebrande rhombendodecaëdervlakken gelijken op een soort Jura-landschap (fig. 9*b*), doch duidelijk is te zien dat de orientaties van de dalen met de kristalrichtingen overeenstemmen: de dalen zijn ovaal, met de lange as volgens de kubusrichting. Op de octaëdervlakken verschijnen driezijdige pyramides, begrensd door kubusvlakken (fig. 9*c*).

Bovengenoemde foto's zijn een goede illustratie voor wat er bij polijsten of slijpen gebeurt.

Bij slijpen langs het (111)-vlak zullen de driezijdige pyramides snel verdwijnen als gevolg van de goede splijtbaarheid langs (111)-vlakken.

Fig. 8. Etsfiguren op de hoofdvlakken van diamant:
a) op kubusvlak,
b) op rhombendodecaëdervlak,
c) op octaëdervlak.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

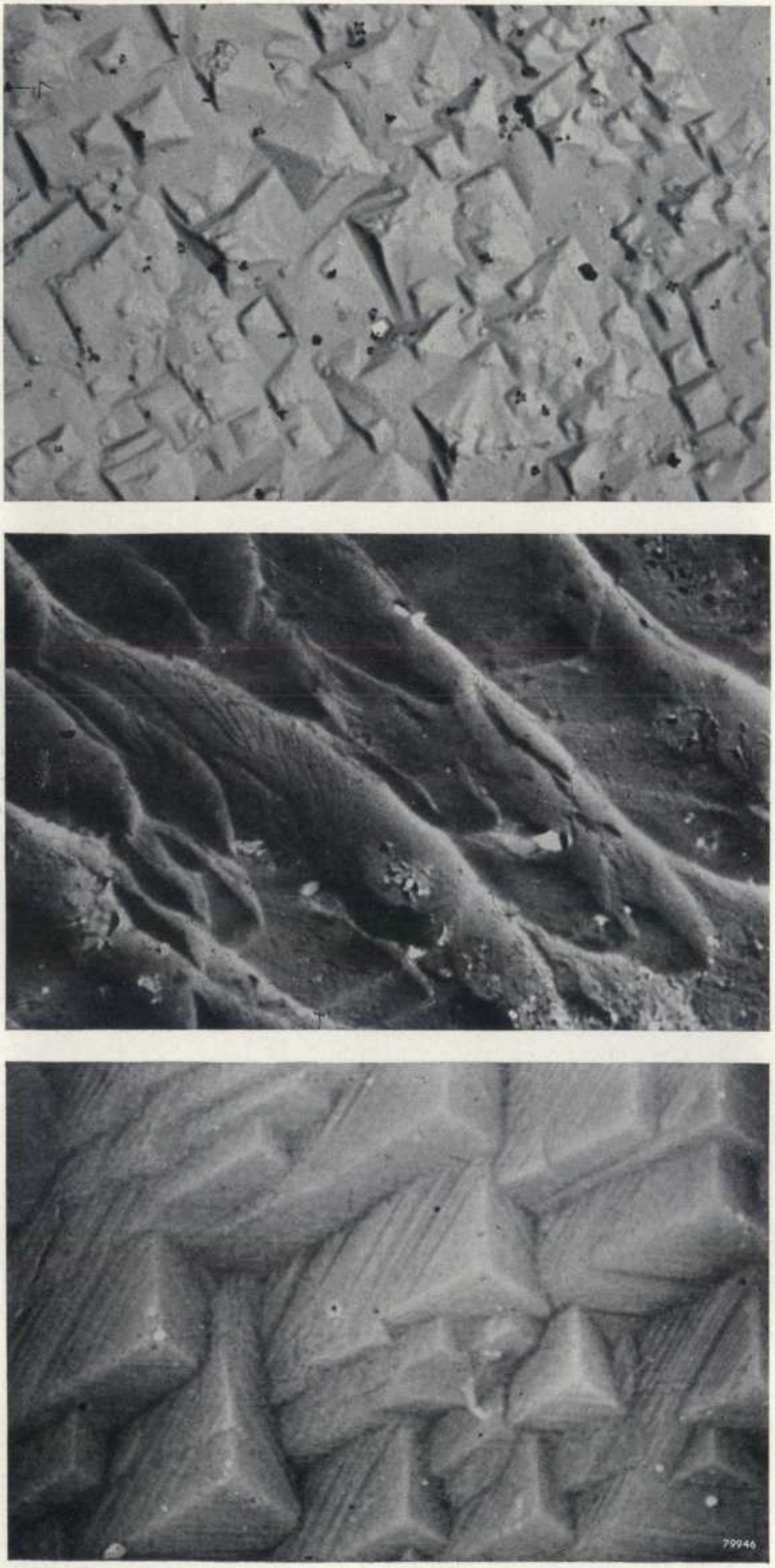


Fig. 9. Electronenmicrofoto's van afgebrande kristalvlakken van diamant. Vergroting 10 000 ×.
a) Kubusvlak.
b) Rhombendodecaëdervlak.
c) Octaëdervlak.

Nadat alle pyramides zijn verdwenen, blijft een volkomen glad vlak achter, dat weinig aangrijpingspunten voor verdere slijtage biedt. Het octaëdervlak is daardoor zeer slijpvast.

Bij het (110)-vlak zullen steeds nieuwe bergruggen blootkomen, daar deze niet volgens een vlak van gemakkelijke splijtbaarheid worden aangegrepen, en de slijtage zal veel regelmatiger door kunnen gaan. Maar er zal een groot verschil moeten zijn naar gelang men dwars op of in de richting van de bergruggen te werk gaat: in het laatste geval zal de slijtage gemakkelijker optreden.

Afslijpen van het kubusvlak zal steeds nieuwe pyramides doen ontstaan, daar ook deze nu niet langs een splijtvlak worden belast en dus niet gemakkelijk verdwijnen.

Resumerend kan dus gezegd worden dat het beeld verkregen door etsen en zichtbaar gemaakt door de electronenmicroscoop, de voorstelling bevestigt die men zich theoretisch van de slijtvastheid der drie hoofdvlakken van diamant gevormd had. Ten slotte echter zal de practijk moeten uitamken of bij het gebruik van theoretisch juist georienteerde trekstenen ook inderdaad de minste slijtage optreedt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Zoals reeds werd aangestipt, zal daartoe, wegens de bijkomende invloed van allerlei niet met de orientatie samenhangende factoren, een uitgebreid statistisch onderzoek nodig zijn.

Samenvatting. Het is theoretisch te verwachten dat de slijtage van diamanten trekstenen aanmerkelijk van de kristallografische orientatie van het trekkanaal afhangt, nl. op grond van de kristallografische rangschikking van, en het speciale bindingstype tussen de koolstofatomen. Daardoor zijn er bepaalde voorkeursorientaties van een diamantvlak, waarlangs het afslijpen relatief gemakkelijk gaat, zoals ook uit de practijk van het diamantbewerken bekend is. Als conclusie wordt gevonden dat de slijtage van een treksteen het geringst zal zijn als het trekkanaal loodrecht op een octaëdervlak is geboord. De verkregen inzichten worden getoetst aan de met een speciale techniek verkregen etsfiguren op de hoofdvlakken van een diamant. Bevestiging der conclusies in de practijk zal slechts mogelijk zijn na statistisch onderzoek van zeer vele trekstenen.

OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLICATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

Van deze publicaties, voor zover niet met een sterretje * gemerkt, verstrekt de Administratie van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven, op aanvrage overdrukken.

2114: J. S. van Wieringen: Anomalous behaviour of the *g*-factor of Li-Fe-Cr-spinels as a function of temperature (Phys. Rev. **90**, 488, 1953, No. 3).

De *g*-factor van de in No. **2113** genoemde spinel, die bij 0 °K de waarde 2 heeft, neemt boven 200 °K sterk af. Komende van hoge temperaturen (450 °K), waar *g* eveneens ongeveer 2 is, neemt *g* toe bij dalende temperatuur en wordt oneindig bij $T = 337$ °K. Dit gedrag wordt qualitatief verklaard uit de *g*-formule van Kittel en uit het verloop van de spontane magnetisatie als functie van de temperatuur.

2115: J. M. Stevels: Le verre considéré comme polymère (Verres et Réfractaires **7**, 91-104, 1953, No. 2).

Bepaalde eigenschappen van silicaatglazen hangen niet af van de soort netwerkwijzigende ionen, maar in hoofdzaak van het aantal brugzuurstofionen per tetraëder, Y, welk getal tevens het aantal contactpunten van elk tetraëder aangeeft: Y geeft dus ook de mate van inwendige samenhang van het netwerk aan. De physische eigenschappen van het glas worden in hoge mate door deze samenhang van het netwerk bepaald: voor Y tussen 4 en 3 heeft men te maken met mechanisch sterke en chemisch resistente glazen; bij waarden tussen 3 en 2 worden de glazen steeds minder resistent; in het geval $Y = 2$ heeft men oneindig lange ketens, die door netwerkwijzigende ionen bij elkaar gehouden worden; dit is dus een zeer zwak rooster, dat zeer gevoelig is voor thermische en mechanische invloeden. Is Y kleiner dan 2, dan zijn de ketens niet meer oneindig lang: silicaten, waarvan de ketens een hoge mate van symmetrie bezitten, kunnen dan reeds ondanks hun lengte uitkristalliseren; de fosfaten daarentegen, die niet symmetrisch zijn, leveren nog glasachtige stoffen tot $Y = 1{,}6$. In het geval der silicaten is echter reeds een kleine storing van de symmetrie voldoende om de kristallisatie tegen te gaan: analoge situaties komt men veelvuldig tegen in de chemie der organische polymere stoffen. Deze beschouwingen worden bevestigd door het onderzoek van de diëlectrische verliezen van het glas in een hoogfrequent electrisch veld. Bij zeer lage temperaturen constateert men het optreden der „deformatieverliezen" van het netwerk, die daaraan te wijten zijn dat zekere stukken van de netwerkketens plotseling in een andere stand overgaan. In het algemeen nemen bij glazen met dalende Y de deformatieverliezen toe, en het maximum dat deze verliezen vertonen als functie van de temperatuur, komt bij steeds hogere temperaturen te liggen.

2116: W. J. Oosterkamp: General considerations regarding the dosimetry of roentgen and gamma radiation (Appl. sci. Res. **B 3**, 100-118, 1953, No. 2; Addendum in Appl. sci. Res. **B 3**, 477, 1954, No. 6).

De schrijver maakt verschil tussen de grootheden „bestraling", thans door de International Commission on Radiological Units aangeduid als „dosis", en „dosis", thans door de I.C.R.U. aangeduid als „geabsorbeerde dosis". De eerste grootheid geeft aan, hoeveel ionen de op een zekere plaats aanwezige röntgenstraling in lucht produceert, en wordt gemeten in röntgen. De tweede grootheid geeft de energie aan die aan het in de röntgenstraling geplaatste materiaal wordt toegevoerd, en wordt gemeten in erg per gram of veelvouden daarvan. De methodes volgens welke men beide grootheden kan meten, worden besproken. Een meting van de dosis in röntgen bij fotonenenergieën boven 3 MeV is niet goed uitvoerbaar. Er volgt een bespreking van de correlatie tussen de dosis en de geabsorbeerde

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

dosis. In materialen die vrijwel equivalent zijn met de lucht, is de dosis bij matige fotonenenergieën een goede maat voor de geabsorbeerde dosis; in een weefsel dat niet equivalent is met lucht, moeten verschillen in massa-absorptiecoëfficient tussen het weefsel en de lucht in rekening worden gebracht; is de atomaire samenstelling aan weerskanten van een grensvlak verschillend, dan zal de grotere productie van secundaire electronen in materialen met een hoog atoomnummer ook een sterkere ionisatie in naburige weefsels met laag atoomnummer teweeg brengen; bij fotonenenergieën boven 1 MeV wordt de correlatie tussen de dosis en de geabsorbeerde dosis op dezelfde plaats steeds minder; de meting van de dosis in röntgen verliest dan haar medische betekenis.

2117: B. D. H. Tellegen: Synthesis of $2n$-poles by networks containing the minimum number of elements (J. Math. Phys. **32**, 1-18, 1953, No. 1).

De methode van Brune voor de synthese van tweepolen wordt uitgebreid tot de synthese van $2n$-polen. Dit leidt tot netwerken met het minimumaantal reactanties en het minimumaantal elementen.

2118: J. I. de Jong en J. de Jonge: Kinetics of the hydroxymethylation of phenols in dilute aqueous solution (Rec. Trav. chim. Pays-Bas **72**, 497-509, 1953, No. 6).

De hydroxymethylering van phenolen werd in het p_H-gebied van 1-11 en tussen 70 en 130 °C in verdunde waterige oplossing onderzocht. De reactie blijkt bimoleculair te zijn. Beneden $p_H = 4$ zijn de gevonden reactiesnelheden evenredig met de concentratie der waterstofionen, terwijl in meer alkalische oplossingen een evenredigheid met de concentratie der hydroxylionen werd gevonden. De concentratie van buffers had geen waarneembare invloed op de reactiesnelheden, evenmin als de aanwezigheid van kleine hoeveelheden tri-ethanolamine. Tot besluit wordt het reactiemechanisme besproken.

2119: J. D. Fast: Low-hydrogen welding rods (Welding J. **32**, 516-520, 1953, No. 6).

Zie Philips techn. T. **74**, 86-91, 1952.

2120: J. I. de Jong: A determination of methylol groups in condensates of urea and formaldehyde (Rec. Trav. chim. Pays-Bas **72**, 653-654, 1953, No. 7).

Methylolgroepen in condensaten van ureum en formaldehyde kunnen met een alkalische oplossing van kaliumcyanide worden bepaald. De overmaat cyanide wordt met mercuronitraat teruggetitreerd.

2121: N. W. H. Addink: Quantitative spectrochemical analysis by means of the constant temperature D.C. carbon arc (Spectrochim. Acta **5**, 495-499, 1953, No. 6).

Overzicht van de door de schrijver ontwikkelde methode met volledige verdamping in de gelijkstroomkoolboog en met projectie van het spectrum op een standaardzwartingsschaal (standard paper density scale of s.p.d. scale). Enkele resultaten worden vergeleken met die van gewone chemische analyse. Zie ook Philips techn. T. **12**, 341-352, 1950.

2122: W. J. Oosterkamp: Die Dosierung weicher Röntgenstrahlung, insbesondere bei Kontakttherapie (Strahlentherapie **91**, 591-594, 1953, No. 4).

De dosismeting bij moderne röntgenbuizen met beryllium- of mica-berylliumvenster eist bijzondere voorzorgen, wegens de heterogeniteit en de sterke absorptie der straling, in het bijzonder wat betreft ionisatiekamer en fantoommateriaal. Er wordt een meetapparatuur beschreven die aan hoge eisen voldoet. Als voorbeeld worden resultaten beschreven van metingen, verricht bij een apparaat voor contacttherapie, dat behalve de gewone stralenqualiteit ook zeer zachte straling (tot in het grensstralengebied) kan geven.

2123: J. Fransen en W. J. Oosterkamp: A universal X-ray dosemeter (Trans. Instr. Meas. Conf. Stockholm 1952, p. 93-94).

Korte beschrijving van ionisatiekamers en bijbehorende meetapparatuur voor het meten van ionisatiestroom (ijking van röntgenbuizen), dosis per tijdseenheid (voor constante bestraling) en totale dosis (variabele bestraling).

2124: W. J. H. Beekman: An X-ray spectrometer for the 200 kV region using a scintillation counter (Trans. Instr. Meas. Conf. Stockholm 1952, p. 84-87).

Er wordt een compacte röntgenspectrometer beschreven met een draaiend kwartskristal, waarbij een scintillatieteller als indicator dient. Parallel aan de röntgenbuis zijn een condensator en een smoorspoel geschakeld; men kan het zo inrichten dat de röntgenbuis als triode fungeert en zelf als interrupter dient voor het verkrijgen van de vereiste hoge pulserende spanning, indien aan een daartoe aanwezig rooster periodieke spanningsimpulsen worden toegevoerd.

2125: H. G. van Bueren: The formation of lattice defects during slip (Acta Metallurgica **1**, 464-465, 1953, No. 4).

Voorlopige mededeling betreffende de verklaring

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van het ontstaan van een elementaire structuur (glijlijnen met een lengte van de orde van 10^{-3} cm en een onderlinge afstand van 10-50 atoomafstanden), zoals door Wilsdorf e.a. is waargenomen bij plastisch vervormd aluminium.

2126: A. van Weel: Susceptance valves and reactance valves as phase modulators (J. Brit. Inst. Radio Engrs. **13**, 315-320, 1953, No. 6).

Triodes kan men op drie verschillende manieren gebruiken om schakelingen met variabele impedantie op te bouwen. De meest gebruikelijke, die gewoonlijk als reactantiebuisschakeling wordt aangeduid, gedraagt zich veeleer als een schakeling met variabele susceptantie. Van de andere twee mogelijke schakelingen is één eveneens een susceptantieschakeling, terwijl alleen de derde een eigenlijke reactantiebuisschakeling is. Alle drie schakelwijzen kunnen met succes in fazemodulatietrappen worden toegepast, waarbij het opmerkelijke is dat men, om fazevariaties tot 45 ° te veroorzaken, slechts één buis nodig heeft. Bovendien kan dit met een steilheidsverandering van slechts 0,5 mA/V worden gerealiseerd, zodat men een grote gevoeligheid en tevens een goede lineariteit heeft.

2127: H. C. Hamaker: Beispiele zur Anwendung statistischer Untersuchungsmethoden in der Industrie (Mitt. Math. Statist. **5**, 211-229, 1953, No. 2/3).

Aan een geschikt gekozen voorbeeld, nl. de meting van de dikte van door electrophorese verkregen oxydelagen op nikkelstaafjes, wordt de toepassing van de zg. „variantie-analyse" op industriële problemen toegelicht. Het resultaat der analyse wordt op eenvoudige, ook voor de niet statistisch geschoolde technicus gemakkelijk te begrijpen wijze weergegeven. Dezelfde methodiek wordt dan op enige andere voorbeelden toegepast, te weten op bepalingen van de verbrandingswarmte van 9 steenkoolsoorten door 9 verschillende laboratoria, op metingen van de diameters van 6 verschillende fietskogels met 7 verschillende micrometers, en op reukproeven genomen voor de selectie van een reukjury in de parfumindustrie. Ook op het begrip „wisselwerking" en de wijze waarop deze door een statistische analyse kan worden geconstateerd, wordt nader ingegaan.

2128: H. P. J. Wijn: Ferromagnetic domain walls in Ferroxdure (Physica **19**, 555-564, 1953, No. 6).

Het is mogelijk gebleken bij preparaten van $BaO.6Fe_2O_3$ (Ferroxdure) een onderscheid te maken tussen de bijdragen tot de aanvangspermeabiliteit geleverd door Bloch-wandverschuivingen en die geleverd door rotaties van de magnetisatie in de Weiss-gebiedjes. Uit metingen van de grootte van elk dezer bijdragen als functie van de frequentie blijkt dat de beweging van de Bloch-wanden een resonantie vertoont bij ongeveer 200 MHz, en dat de bijdrage van de rotaties tot boven 3000 MHz onafhankelijk is van de frequentie. De mogelijkheid van resonantie van Bloch-wanden is in de literatuur reeds verscheidene malen geopperd en de op grond van theoretische overwegingen verwachte resonantiefrequentie komt goed overeen met die welke experimenteel is waargenomen.

2129: W. Hoogenstraaten: The chemistry of traps in zinc sulfide phosphors (J. Electrochem. Soc. **100**, 356-365, 1953, No. 8).

De invloed van de chemische samenstelling op het optreden van vangplaatsen in zinksulfidefosforen wordt onderzocht. Voor de eenvoudigste fosforsystemen worden eenvoudige emissiekrommen (glow curves) met een enkele piek gevonden. Deze fosforen bevatten alleen activatoren en co-activatoren in grondmaterialen van zuivere sulfides. Als co-activatoren worden aangeduid verontreinigingen die noodzakelijk zijn om de activatoren in het zinksulfiderooster te stabiliseren. Deze blijken het gedrag van de fosfor wat de vangplaatsen betreft in hoge mate te beheersen. Bij aanwezigheid van Cl^-, Br^- en Al^{3+} als co-activatoren in ZnS-Cu wordt voor de diepte der vangplaatsen een waarde van 0,37 electronvolt (eV) gevonden, evenzo 0,51 eV voor Sc^{3+}, 0,62 eV voor Ga^{3+}, en 0,74 eV voor In^{3+}. Door zuurstof en door de doofstoffen (killers) cobalt en nikkel worden nieuwe pieken in de emissiekromme en nieuwe vangplaatsen veroorzaakt. Een mengkristalvorming met cadmiumsulfide of zinkselenide heeft in het algemeen een verschuiving der emissiekromme naar lagere temperaturen, en dus het ondieper worden der vangplaatsen, ten gevolge.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!